

# **Aplicación de la impresión 3D en la fabricación de componentes de motores marinos**

**Treball Final de Màster**



Facultat de Nàutica de Barcelona  
Universitat Politècnica de Catalunya

Treball realitzat per:  
**Eric Pascual Soldevilla**

Dirigit per:  
**Manuel Rodríguez Castillo**

Màster en Gestió i Operació d'Instal·lacions Energètiques Marítimes

Barcelona, 10 de Maig de 2018

Departament de Ciències i Enginyeries Nàutiques







“Podemos ver nuestro pasado y predecir nuestro futuro”



# AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría agradecer a mis padres, hermanas y familia en general haber hecho que este día se posible, gracias a ellos hoy puedo estar aquí. Todo el apoyo, guías y referencias han conseguido eso.

A todos los profesores de facultad y cursos anteriores, gracias a ellos por conseguir guiarme hasta dónde estoy ahora.

Agradecer a Manuel Rodríguez la paciencia y confianza que ha tenido durante estos años conmigo.

Compañeros de trabajo que han seguido formándome continuando la estela anterior.

Y en especial, y por supuesto, a mi novia por todo el apoyo recibido por su parte, estudiar y trabajar quita mucho tiempo, gracias.

Gracias por hacer posible la redacción de estas páginas.





# RESUMEN

El objetivo del trabajo es llevar a cabo un análisis de la fabricación de motores de combustión. Estudiar las distintas maneras de optimizar estos procesos mediante la utilización de una impresora 3D para poder llegar a imprimir directa o indirectamente estos motores y todas las piezas necesarias para su montaje. Para lograr este objetivo será necesario analizar los modos de fabricación de motores térmicos y las tecnologías de impresión en tres dimensiones y sus posibles aplicaciones actualmente.

## ABSTRACT

The aim of this Project is to carry out an analysis of the manufacture of thermal engines. Study the different ways to optimize these processes with the use of 3D printer to be able directly or indirectly print these engines and all the parts necessary for assembly. To achieve this goal, it will be necessary to analyze the manufacturing modes of thermal engines and three-dimensional printing technologies and their possible applications today.

# ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	7
RESUMEN.....	9
ABSTRACT .....	10
ÍNDICE .....	11
Listado de Figuras.....	15
Listado de Tablas.....	19
Introducción.....	21
Capítulo 1: El motor térmico .....	23
3.1    Historia .....	23
1.1.1    El motor térmico.....	25
1.1.2    Motores con control electrónico.....	27
Capítulo 2: Métodos de fabricación actual.....	31
2.1    Fabricación de motores.....	32
2.1.1    Fabricación común de motores .....	32

2.1.1.1	Fabricación de piezas en bruto.....	33
2.1.1.2	Creación del modelo .....	33
2.1.1.3	Creación del molde .....	34
2.1.1.4	Mecanizado.....	34
2.1.2	Tecnologías de fabricación por tipo de pieza .....	36
2.1.2.1	Bloque motor .....	36
2.1.2.2	Cilindros .....	38
2.1.2.3	Pistón.....	40
2.1.2.4	Cigüeñal .....	42
2.1.2.5	Válvulas.....	44
2.1.2.6	Culata .....	49
2.1.2.7	Cárter.....	50
2.1.2.8	Árbol de levas.....	51
Capítulo 3:	La impresión 3D .....	53
3.1	Historia .....	54
3.1.1	Cronología .....	55
3.2	Tecnologías de impresión 3D actuales.....	59
3.2.1	Fotopolimerización.....	59

---

3.2.1.1	Estereolitografia o SLA.....	60
3.2.1.2	DLP y CDLP.....	61
3.2.2	Extrusión de material.....	61
3.2.3	Inyección de material.....	63
3.2.4	Aglutinante.....	64
3.2.5	Fusión por lecho de polvo.....	69
3.2.5.1	Multi Jet Fusion (MJF).....	70
3.2.5.2	Sinterización selectiva por láser (SLS).....	71
3.2.5.3	Sinterización directa por láser (DMLS/SLM).....	72
3.2.5.5	Fusión por haz de electrones (EBM).....	73
3.2.6	Deposición de energía directa (DED).....	74
3.2.6.1	Ingeniería laser en forma neta (LENS).....	75
3.2.6.2	Fabricación aditiva por haz de electrones (EBAM).....	75
3.2.7	Otras tecnologías.....	76
3.2.7.1	Laminado de hojas.....	76
3.2.7.2	Inyección simple (SPJ).....	77
3.2.7.3	Otras tecnologías de adición de material directa.....	78
Capítulo 4: Aplicaciones.....		81

---

4.1	Impresión de motores y sus componentes.....	81
4.1.2	Aplicación en un buque .....	84
4.1.2.1	Impresión casco.....	84
4.1.2.2	Impresión de una hélice .....	85
4.1.2.3	Reparaciones en operación.....	86
4.1.3	Principales aplicaciones y negocios.....	87
Capítulo 5: Impacto medioambiental .....		91
Capítulo 6: Análisis económico .....		94
Conclusiones.....		96
Bibliografía.....		99
Anexo 1: Videografía de tecnologías de impresión 3D.....		101
Anexo 2: Artículos de aplicaciones en la industria de la impresión 3D.....		103

## Listado de Figuras

Figura 1. Máquina de vapor de James Watt. (RH PAE News).....	24
Figura 2. Ilustración del primer motor térmico. (wired.com).....	26
Figura 3. Imagen del primer motor diésel. Alma de herrero.....	27
Figura 4. Sulzer RT-Flex (Wärtsilä.com) .....	28
Figura 5. Comparativa de emisiones NOx según el tipo de motor. (tecnología-marítima.com) .....	29
Figura 6. Wärtsilä-Sulzer 14RTFLEX96-C saliendo de fábrica. (motorpasion.com) .....	30
Figura 7. Bloque de motor 6 cilindros en línea BMW. (Diariomotor.com) .....	36
Figura 8. Bloque motor en cadena de montaje. (Gizmodo.com).....	38
Figura 9. Cilindros y camisas en un bloque motor. (Pruebaderuta.com).....	39
Figura 10. Pistón y biela. (motorman.cl) .....	40
Figura 11. Cigüeñal Emma maersk sobre bancada. (Wärtsilä.com) .....	43
Figura 12. Esquema de una válvula. (mundodelmotor.net) .....	45
Figura 13. Válvulas monometálicas. (Mahle original).....	46
Figura 14. Válvulas bimetálicas. (Mahle original).....	46

Figura 15. Válvula hueca rellena de sodio. (Mahle original) .....	47
Figura 16. Culata motor 4 cilindros. (técnica del motor blog) .....	50
Figura 17. Cáster. (mechanicsdrags.com) .....	51
Figura 18. Representación de árbol de levas en funcionamiento. (motorgiga.com) .....	51
Figura 19. Tecnología de impresión 3D FDM. ....	54
Figura 20. Esquema de funcionamiento de la estereolitografía. (Materialgeez) .....	61
Figura 21. Extrusor de una impresora FDM. ....	62
Figura 22. Proceso de fabricación de una pieza metálica mediante un molde impreso en arena. (VoxelJet).....	67
Figura 23. Proceso de fabricación de una pieza metálica mediante la impresión de una pieza plástica. (Voxeljet) .....	69
Figura 24. Engranajes impresos con Multi Jet Fusion. (Hp.com) .....	71
Figura 25. Funcionamiento Multi Jet Fusion. (hp.com) .....	71
Figura 26. Funcionamiento SLS. (tth.com).....	72
Figura 27. Sinterizado directo de metal por láser. (3dnatives.com) .....	73
Figura 28. Álabes de turbina de baja presión realizado con EBM. (arcam.com).....	74
Figura 29. Pieza metálica impresa por Sciaky. (Sciaky.com) .....	76
Figura 30. Funcionamiento de la tecnología LOM. (Helisys.com) .....	77
Figura 31. Pieza realizada con la tecnología DMT (insstek.com) .....	79



Figura 32. Peça realitzada per la màquina LASERTEC 65 3D Hybrid de DMG Mori. (3dprintmagazine.eu).....	80
Figura 33. Peça realitzada amb la tecnologia d'impressió 3D amb silicats. (Voxeljet.com) .....	82
Figura 34. Peça complexa realitzada amb Multi Jet Fusion. (hp.com) .....	83
Figura 35. Impresora de DMG Mori en funcionament, aportant material i mecanitzant la peça. (dmgmori.com) .....	84
Figura 36. Yate imprès íntegrament en 3D per Livrea. (livreayacht.com) .....	85
Figura 37. Hélice de bronze impresa en 3D. (ramlab.com) .....	86



## Listado de Tablas

Tabla 1. Materiales de fabricación de las válvulas. (Mahle original).....	47
Tabla 2. Cronología Impresión 3D. (Biblioteca GC).....	56
Tabla 3. Tabla carcterísticas fotopolimerización.....	60
Tabla 4. Comparativa tecnologías de fusión por lecho de polvo .....	70
Tabla 5. Aplicaciones en cada sector de la impresión 3D. ....	87
Tabla 6. Comparativa Impacto medioambiental.....	93



# Introducción

La impresión 3D está siendo considerada como el artífice de una Tercera Revolución Industrial, una tecnología nacida tiempo atrás pero que está consolidándose y evolucionando a pasos agigantados en la última década y sobre todo en el último lustro.

Muchas son las industrias que están apostando por la inversión en este tipo de máquinas para facilitar y optimizar los procesos industriales, la fabricación de componentes de motores térmicos en general y marinos en particular es una de las infinitas opciones que la impresión en tres dimensiones puede llegar a ofrecer.

En este trabajo se llevará a cabo un estudio de las tecnologías actuales y sus posibles aplicaciones. Para ello se analizarán dichas tecnologías en sus aplicaciones actuales y la manera de adaptarlas para el fin requerido.

La versatilidad aportada por la impresión 3D es una característica que debe ser aprovechada y potenciada para la fabricación de cualquier pieza necesaria tanto a nivel industrial como doméstico.

La impresión 3D está en constante evolución y por tanto con el paso del tiempo se verán incrementando sus posibles utilidades y optimizando sus procesos, para que todo ello siga su curso se debe tener en cuenta desde el principio.

En una industria tan robusta en cuanto a procesos se refiere como son los motores marinos, es un reto poder llegar a implementar de una manera rápida y sencilla la fabricación mediante impresión 3D, las ventajas aportadas deben tener la fuerza suficiente como para ser capaces de introducir mejoras desde el principio.



# Capítulo 1: El motor térmico

Para poder llegar a hablar sobre los motores actuales y sus posibles innovaciones venideras, es necesario empezar por la propia máquina de vapor y la revolución industrial.

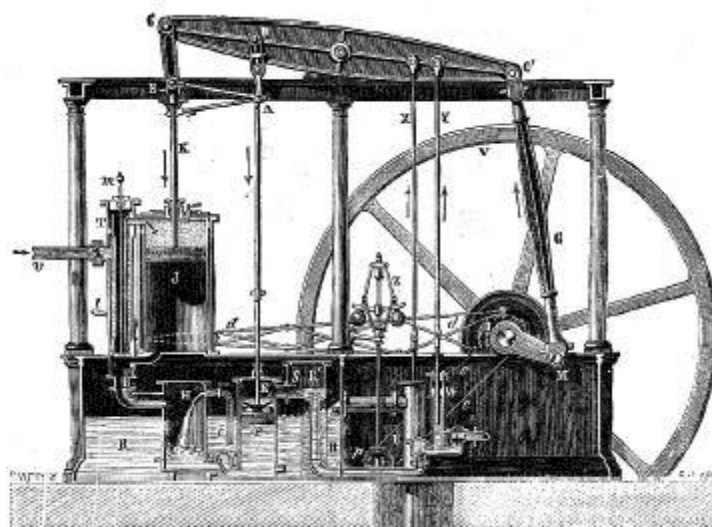
## 3.1 Historia

Sin poder determinar una fecha exacta a la invención de la máquina de vapor, se conoce que los primeros prototipos de una máquina que conseguía, a través del vapor, “abrir y cerrar las puertas de un templo” fueron recopilados por Herón de Alejandría en el manuscrito “Spiritalia seu Pneumatica” en el cual detallaba el funcionamiento de unos mecanismos gracias al movimiento generado por agua calentada con fuego, vapor. Posteriormente, ya en 1606 se patentó la que se cree, fue la primera máquina de vapor moderna por Jerónimo de Ayanz y Beaumont, dicha patente está recogida en el libro de “privilegio de invención”, nombre que se daba por aquel entonces a las patentes, y firmada por Felipe III.

A lo largo de la historia, varios han sido los inventos que, utilizando el vapor de agua, se han llevado a cabo para conseguir una máquina funcional y que facilitara una labor al ser humano. Con todos ello se llegó hasta la que es considerada la primera máquina de vapor y por ende artífice y motor de la revolución industrial.

El primer diseño de esta máquina de vapor fue obra de Thomas Newcomen en 1712, capaz de bombear agua en las minas de carbón y estaño en Cornualles, James Watt fue capaz de perfeccionar dicho diseño para crear un modelo que vio la luz en 1768 y fue

patentada un año más tarde, en 1769. La siguiente figura muestra una ilustración de la máquina de vapor de Watt.



*Figura 1. Máquina de vapor de James Watt. (RH PAE News)*

Con la creación de la máquina de vapor de Watt, se facilitaron las labores de extracción de carbón en minas, funcionamiento de telares y la construcción de locomotoras y buques a vapor. Con estas evoluciones en el transporte, terrestre y marítimo, el crecimiento económico y tecnológico del mundo, especialmente Europa y Estados Unidos, creció de manera exponencial.

Este crecimiento acelerado, llevó a un proceso de transformación económico, social y tecnológico en la segunda mitad del siglo XVIII, el cambio fue tal que la renta per cápita creció como nunca antes en la historia había ocurrido, Robert Lucas dijo "Por primera vez en la historia, el nivel de las masas y la gente común experimentó un crecimiento sostenido (...) No hay nada remotamente parecido a este comportamiento de la economía en ningún momento del pasado."

El rápido crecimiento generado a partir de ese momento dio lugar a muchas más invenciones inspiradas en la propia máquina de vapor, invenciones como el propio motor



de combustión, que fue una evolución de la máquina de vapor de Watt. (García Tapia, 2002)

### 1.1.1 El motor térmico

La aparición del motor térmico estuvo íntimamente ligada con el automóvil, la máquina de vapor era demasiado voluminosa como para poder ser utilizada en un vehículo. Era necesario integrar el horno, la caldera y el cilindro de la máquina de vapor en una máquina mucho más compacta. La primera patente del motor térmico fue obra de Philippe Lebon en 1800, funcionaba con una mezcla de aire y gas de alumbrado, capaz de explotar en el interior de un cilindro. Lebon no consiguió materializar su idea fuera de un ambiente experimental.

En 1852 Etienne Lenoir aprovechó la idea de Lebon y la mejora que realizó Rivaz con el combustible y llevó a cabo el primer prototipo de un motor térmico con autoencendido, un vehículo equipado con su motor consiguió llevar a cabo un viaje entre Paris y Joinville-le-Port, un trayecto de actualmente 12 km. El motor de Lenoir no tenía la potencia suficiente ya que no era capaz de comprimir la mezcla de aire y combustible en el interior del cilindro, se estima que dicho propulsor solo era capaz de aprovechar un 3% de la energía que producía.

Este problema se solucionó cuando en 1862, Alphonse Beau de Rochas, ideó el ciclo de cuatro tiempos, Nikolaus August Otto consiguió plasmar su idea fabricando motores fijos de gas. El ciclo de cuatro tiempos de un motor térmico de gasolina se denomina ciclo Otto gracias a él. Otto trabajó junto con Gottfried Daimler, quien adquirió grandes conocimientos que posteriormente aplicaría.

Después de varios intentos de Daimler por obtener un motor capaz de utilizarse una manera sencilla en un automóvil, Daimler en compañía de Wilhelm Maybach empezó a realizar ensayos con el primer motor de gasolina. Consiguieron fabricar un motor compacto capaz de ser integrado de manera sencilla en un vehículo, llegando incluso a

alcanzar las 900 rpm. En 1886 se ensambló en un carruaje, en lo que podría considerarse el primer vehículo con motor gasolina de la historia. Paralelamente Karl Benz consiguió realizar un diseño similar del motor de cuatro tiempos que consiguió patentar. En la figura 2 pueden observarse el diseño realizado por Daimler y Maybach. (Squattriglia, 2010)

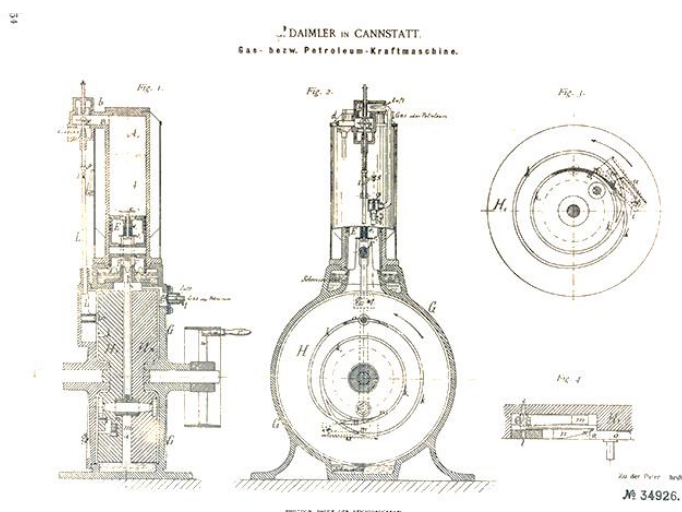


Figura 2. Ilustración del primer motor térmico. (wired.com)

Rudolf Diesel en 1883 estudiaba las posibles alternativas al motor térmico que estaba siendo desarrollado por Daimler, en ellos describía la posibilidad de utilizar cómo combustible el polvo de carbón inyectado a altas presiones con aire a temperaturas elevadas, de esta manera no era necesaria la acción de una chispa para producir la detonación.

En 1893 Rudolf Diesel, trabajador en MAN, dirigió un proyecto para llevar a cabo su idea, de este proyecto salieron varios prototipos de este motor hasta que en 1897 se fabricó el primer motor diésel de la historia. Era capaz de generar hasta 25 CV de potencia, un motor de cuatro tiempos mono cilíndrico que experimentaba el autoencendido, pero sin la necesidad de un agente externo ni carburador. Un año más tarde, MAN comercializó su primer motor diésel, un motor bi-cilíndrico de 60 CV.



*Figura 3. Imagen del primer motor diésel. Alma de herrero.*

Antes de trabajar en MAN, Rudolf Diesel, estuvo en *Sulzer Brothers* como aprendiz, una vez desarrollado el motor diésel, Sulzer firmó un acuerdo con el propio Rudolf para poder utilizar su tecnología en la fabricación de motores diésel, que comenzó en Wintethur en 1903. Sulzer siguió el desarrollo de este motor para poder implantarlo en buques, en 1905 construyeron el primer motor diésel de dos tiempos marino directamente acoplado y reversible.

La innovación en este ámbito siguió en Sulzer, que seguía desarrollando motores para buques, cada vez con más potencia, más eficientes y con menos mantenimiento. En 1920 ya era una marca famosa en todo el mundo por la fabricación de motores diésel para buques, centrales eléctricas y ferrocarriles.

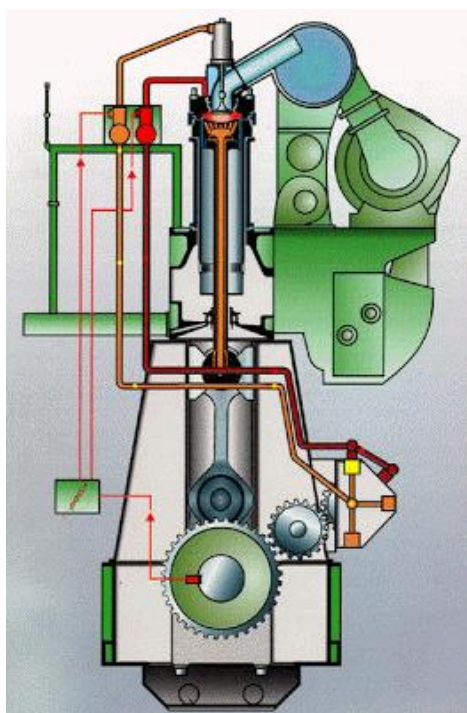
A lo largo de la historia los motores térmicos han ido evolucionando hasta convertirse en lo que hoy conocemos, motores cada vez más potentes y a su vez más eficientes y respetuosos con el medio ambiente. Las normativas actuales son muy rigurosas y los fabricantes deben adaptarse con la evolución tecnológica pertinente si es necesario. ()

### 1.1.2 Motores con control electrónico

Los motores controlados electrónicamente, denominados motores inteligentes, se introdujeron al mercado en a partir del año 2002 de la mano de Man y Sulzer, esta última

actualmente forma parte del grupo Wärtsilä, ambos fabricantes demostraron en ese momento que el funcionamiento de un motor de 2 tiempos sin árbol de levas era posible, para lograrlo aplicaron un control electrónico en la inyección de combustible y en los sistemas que actuaban en la válvula de escape.

En la figura 4 puede observarse el primer motor de control electrónico de Sulzer, el RT-Flex. Pulsando encima podremos ver una animación de su funcionamiento.



*Figura 4. Sulzer RT-Flex (Wärtsilä.com)*

La evolución de estos motores con el paso de los años ha desembocado en la capacidad de los mismos de monitorizar sus condiciones de funcionamiento y auto ajustar los parámetros de trabajo para obtener un rendimiento óptimo en cualquier régimen de funcionamiento, de esta manera se consiguen reducir las emisiones contaminantes, en la figura 5 pueden apreciarse las emisiones de NO<sub>x</sub> en los distintos tipos de motores de dos tiempos (Los "Standard", anteriores a 2002, "Delayed injection", desde 2002 hasta la actualidad aunque prácticamente no se fabrican y han evolucionado en los "High compression ratio" .

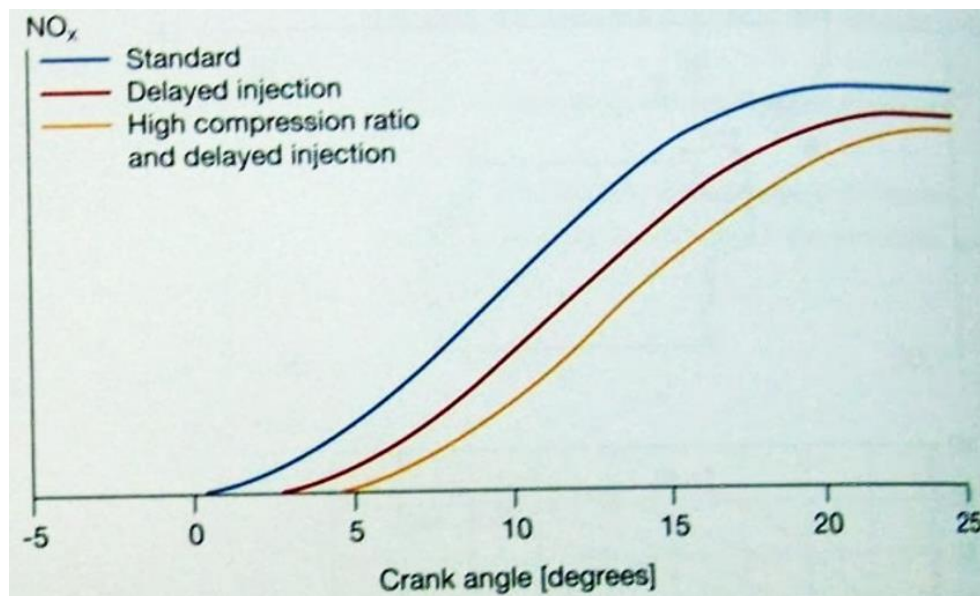


Figura 5. Comparativa de emisiones NOx según el tipo de motor. (tecnología-marítima.com)

En los motores actuales el sistema recoge los datos de funcionamiento constantemente y los compara con los valores definidos de fábrica, en el momento que el sistema detecta desviaciones o algún tipo de funcionamiento anormal, el sistema adopta de manera automática medidas correctoras para que los valores vuelvan a su estado óptimo.

Todos estos avances en la historia de los motores marinos desencadenaron en la producción de motores de dos tiempos capaces de transportar cifras cercanas a los 20000 TEU en un barco portacontenedores, el Wärtsilä-Sulzer 14RTFLEX96-C del Emma Maersk, capaz de generar hasta 84MW (114800 CV) es la herencia de los primeros motores diésel fabricados en un pequeño taller suizo por *Sulzer Brothers*.

La tendencia actual en la fabricación de motores marinos de dos tiempos está llevando a el desarrollo de motores ligeramente más pequeños (87000 CV) para transportar incluso más carga, las normativas medioambientales son muy rigurosas en cuando a emisiones se refiere y requieren de medidas de acción en el corazón de este tipo de buques.



*Figura 6. Wärtsilä-Sulzer 14RTFLEX96-C saliendo de fábrica. (motorpasion.com)*

La innovación tecnológica llevada a cabo en los motores en general y marinos en particular requieren de nuevos procesos de fabricación y diseño para conseguir nuevos avances, se detallarán los procesos actuales y posibles formas de mejorarlos. (2012)

## Capítulo 2: Métodos de fabricación actual

Durante años la producción de motores ha seguido en la misma línea sin grandes cambios en su ejecución.

La automatización de los procesos industriales a través de los años ha dado lugar a un gran avance en la industria. Todo ello ha sido posible gracias a una serie de factores entre los que se encuentran las nuevas tecnologías en el campo mecánico, la introducción de los ordenadores, y sobre todo el control y la regulación de sistemas y procesos. Los sistemas de diseño y simulación por ordenador son un arma perfecta para que ingenieros realicen una amplia gama de trabajos que van desde la creación y el ensamblaje de las piezas, hasta la elaboración de predicciones relativas a la vida útil del producto.

Todas estas simulaciones han conseguido que sea relativamente sencillo y tenga un coste muy bajo la realización de modelos virtuales y sus consecuentes análisis sin necesidad de tener que realizar un prototipo del mismo.

Las empresas invierten grandes cantidades de dinero en esta tecnología y sus resultados son indiscutibles pero una cosa es la simulación y otra bien distinta es la realidad. No siempre es posible detectar todos los defectos o conocer las prestaciones reales de los motores. En la mayoría de los casos es aconsejable fabricar modelos reales de las piezas con el fin de poder analizar mejor los resultados obtenidos, someterlos a una batería de



pruebas de esfuerzos sobre todo en aquellos casos en los que se diseñan moldes a partir de las superficies creadas con en el sistema CAD (diseño asistido por ordenador) para comprobar que los resultados obtenidos con los diseños son aplicables a la vida real.

## 2.1 Fabricación de motores

### 2.1.1 Fabricación común de motores

En la fabricación de motores se utilizan diversas tecnologías dependiendo de la pieza a fabricar, los esfuerzos a los que será sometido el motor y el tipo de trabajo que realizará durante su vida útil.

Cada parte del motor necesita de unos acabados extra que otras piezas no requieren y por lo tanto no es necesario realizar procesos de fabricación costosos y tediosos.

Para crear una pieza es necesario transferir toda la formación obtenida por el CAD a otra aplicación informática que será la responsable de gestionar la perfecta fabricación de la pieza. En este punto entra en acción la fabricación asistida por ordenador (CAM), una aplicación informática que crea instrucciones detalladas (G-código) que serán empleadas por las herramientas para la fabricación de piezas. Básicamente este software le dice por ejemplo a un brazo robotizado cómo tiene que moverse, que broca emplear, etc. para crear la pieza. Los fabricantes de muchas industrias dependen de las capacidades de CAM para producir piezas de alta calidad. Una vez traspasados los datos es necesario realizar dos procesos para crear los componentes que forman un motor: la fabricación de las piezas en bruto y posteriormente la mecanización. A continuación, se detallan los procesos a seguir para ello. (Giacosa) (Singal, 2012)



#### *2.1.1.1 Fabricación de piezas en bruto*

El primer paso será crear las piezas principales mediante la fundición en molde de arena. Es el proceso más utilizado. La fundición en molde de arena consiste en verter metal fundido en un molde de arena, dejarlo solidificar y romper después el molde para remover la fundición. Posteriormente la pieza pasa por un proceso de limpieza e inspección, pero en ocasiones requiere un tratamiento térmico para mejorar sus propiedades metalúrgicas.

Vaciar metal fundido es relativamente sencillo, lo más complejo del proceso es crear toda la estructura que sirva de molde para la pieza.

#### *2.1.1.2 Creación del modelo*

Para iniciar el proceso es necesario tener un modelo de la pieza en cuestión ligeramente agrandado ya que el metal se contrae cuando se solidifica. Los materiales que se usan para realizar estos modelos incluyen; madera, metales o plásticos.

Los métodos más avanzados crean los moldes mediante impresoras 3D que reflejan con total fidelidad la estructura de la pieza diseñadas con el CAD.

Para facilitar la tarea de ensamblado posterior el modelo se divide en dos a lo largo de un plano. Dividirlos facilita la tarea de creación de los moldes a la vez que son más apropiados para reproducir formas complejas.

Crear modelos es uno de los métodos más utilizados en la fabricación de los motores.

### *2.1.1.3 Creación del molde*

Para ello se emplea normalmente arena (sílice) mezclada con aglutinantes (resinas) para fortalecer el molde. Esta mezcla se compacta mediante una prensa alrededor del modelo en un recipiente llamado caja de moldeo. Una vez concluido el moldeo de los componentes obtenemos dos negativos, uno de la parte inferior y otro de la superior de la pieza que posteriormente serán unidos para formar la estructura exterior de la pieza.

El siguiente paso será crear el complejo entramado interno del motor. Para hacerlo es necesario utilizar un corazón, un modelo a tamaño natural de las superficies interiores fabricado generalmente con arena especial compactada debido a que debe ser más resistente que el molde, ya que es necesario manipularlos para su colocación posterior. El corazón se inserta en la cavidad del molde antes del vaciado, para que, al fluir el metal fundido, solidifique entre la cavidad del molde y el corazón, formando así las superficies externas e internas de la fundición. Dependiendo de la complejidad de la pieza puede que sean necesarios varios corazones.

Una vez listo el molde, se vierte el metal en su interior, se deja enfriar, se retira el molde y sale el bloque en bruto. El metal utilizado dependerá de la pieza a fabricar. Para el bloque motor y la culata se emplean aleaciones de acero, aluminio u otros materiales, dependiendo de cuál sea el uso del motor.

Después del enfriado se limpia la pieza con aire y agua a presión para eliminar restos, pasa por un tratamiento de revenido de la fundición (templado) para estabilizar el material y se envía a mecanizar.

### *2.1.1.4 Mecanizado*

El mecanizado es un proceso que se realiza sobre la pieza en bruto procedente de la fundición y consiste en un conjunto de operaciones mediante las cuales se va eliminando

material. Para hacerlo las herramientas siguen las órdenes diseñadas por el CAM hasta dejar la pieza lista. Los agujeros donde encajan los tornillos es un ejemplo de las actuaciones que se realizan en este momento.

Las partes principales a mecanizar son las caras del bloque motor, cárter y culata, esta última con gran precisión y unas tolerancias geométricas y dimensionales muy exigentes. También se realiza el labrado y maquinando de los cilindros, las cavidades para el cigüeñal, las animas para los cojinetes de los árboles de levas y perforaciones varias para que el agua o el aceite, dependiendo de la pieza pueda circular y enfriar el motor. El cigüeñal también recibe un proceso de maquinado intenso.

Muchas veces, cuando se está trabajando sobre las piezas, se advierten defectos que hace que las mismas sean desechadas, aunque siempre al final del proceso se realizan infinidad de pruebas para controlar la calidad del producto. Una de ellas por ejemplo es un control de estanqueidad, que comprueba que no existan fugas de ningún tipo en el bloque motor. Existen brazos robotizados para hacen mediciones 3D de todo el mecanizado con una precisión muy alta, alcanzando valores de una micra. El objetivo es conseguir la perfección absoluta o al menos dentro de los márgenes de calidad.

Una vez pulidos todos los componentes y se ha finalizado el control de calidad se inicia la línea de montaje donde se procesa y acoplan todos los componentes del motor mediante tornillos, tuercas u otros métodos sobre el bloque motor. Este trabajo lo realizan en algunas fases maquinaria robotizada, aunque son los operarios los que acoplan la mayoría de las piezas.

## 2.1.2 Tecnologías de fabricación por tipo de pieza

Cada pieza del motor se fabrica de una manera concreta para optimizar el proceso al máximo en cuanto a calidad de los propios acabados, tolerancia y coste. Analizaremos los procesos de fabricación llevados a cabo para partes críticas del motor, así como las más importantes.

### 2.1.2.1 Bloque motor

El bloque motor, también conocido como bloque de cilindros, está construido de una sola pieza, está fabricado por aleaciones de acero, aluminio y en algunos casos magnesio, dependiendo de su aplicación final y se encuentra entre la culata y el cárter. En su interior se alojan los cilindros del motor y los soportes de apoyo para el cigüeñal. En el bloque motor también se alojan las camisas, los pistones, el empaque de culata, anillos, bulones y conductos de refrigeración. El bloque motor marcará la denominación del propio motor por la disposición y el número de sus cilindros.



*Figura 7. Bloque de motor 6 cilindros en línea BMW. (Diariomotor.com)*

## **Fabricación**

La fabricación de un bloque motor comúnmente utilizada es la fabricación mediante un molde de arena, para ello se realiza una mezcla de cola y un agente endurecedor con arena de zircón (silicato de circonio ( $\text{ZrSiO}_4$ )).

Este molde es capaz de soportar las altas temperaturas del metal fundido para realizar la pieza. El molde está compuesto por partes más pequeñas que forman el núcleo base del propio molde, que servirá de base para el resto de piezas que más tarde serán ensambladas al molde. Estas partes se conforman en un molde mediante la ayuda de una prensa hidráulica que da su forma a la mezcla realizada anteriormente, seguidamente se le aplica un gas que es el encargado, mediante una reacción química, de activar el endurecedor, de tal manera que el molde se endurece para poder continuar con el proceso. Todos los núcleos realizados en la cadena de montaje llegan a un punto en el que son ensamblados para darle la forma específica al molde del bloque. Se utiliza cola para unirlos y polvos de talco para sellar posibles juntas.

Paralelamente se funden los lingotes del material en un horno de gas para obtener rápidamente las temperaturas deseadas y poder verter el material en el interior del molde.

Los cilindros del molde se calientan mediante corrientes eléctricas para que el metal se adhiera perfectamente a la superficie del molde, en ese momento se vierte el material fundido en el interior del molde para posteriormente pasar a un horno de recuperación en el que la cola del molde es eliminada y se mejoran las propiedades del metal, de esta manera el molde se desprende del bloque. Un mecanismo se encarga de retirar la mezcla de arena sobrante que pueda quedar en el bloque. En la siguiente figura pueden apreciarse varios bloques acabados en una cadena de montaje, posteriormente el fabricante, procederá a darle un mecanizado final más exhaustivo. (Rodríguez, 2017)



*Figura 8. Bloque motor en cadena de montaje. (Gizmodo.com)*

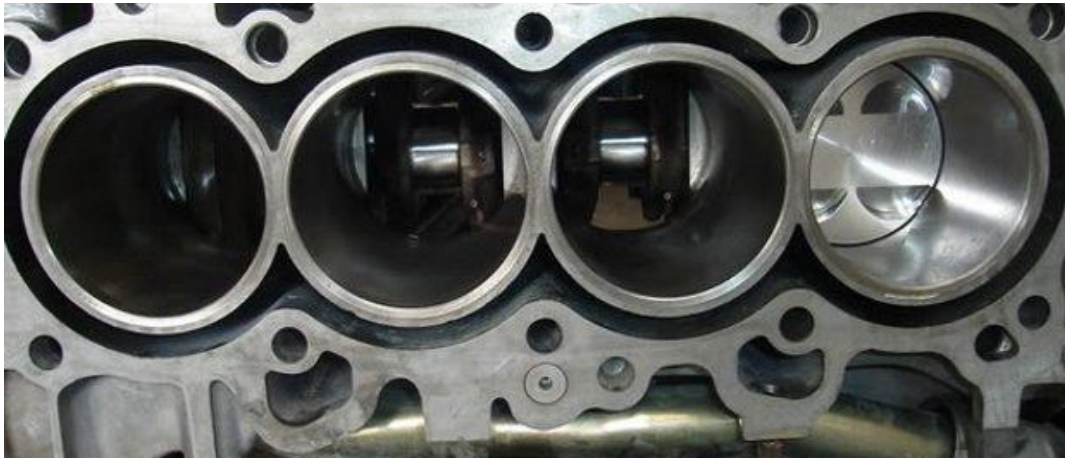
Posteriormente se aplica un post procesado al bloque para compensar la merma del 7%, producida en la solidificación del material, necesaria para la realización del bloque con correctas cotas. Una vez realizados estos pasos se mecanizarán las partes más críticas del bloque para obtener acabados superficiales prácticamente perfectos. (Giacosa)

### *2.1.2.2 Cilindros*

Los cilindros son las piezas, llamadas como su forma geométrica indica, por las que circulan los pistones, se encuentran alojados en el interior del bloque y están fabricados con materiales resistentes, ya que soportan constantes explosiones y están sometidos a grandes esfuerzos, existen motores con distinto número de cilindros, la cantidad de cilindros en un motor aportará la denominación al mismo.

El conjunto al que, comúnmente se suele denominar como cilindro, es el conjunto del propio cilindro en el interior del bloque motor y la camisa del cilindro. Como se especifica en el punto anterior, los cilindros se realizan en el conjunto del propio bloque motor, por tanto, son realizados gracias a un molde de una mezcla de arena y la colada del metal posteriormente. Para conseguir unos acabados excelentes se realiza un mecanizado posterior en el que el cilindro es una de las partes más críticas. En el interior del cilindro,

durante el funcionamiento del motor, se alojará la camisa del cilindro por la cual, el pistón realizará un movimiento lineal continuo gracias a la expansión del pistón. Por esta razón el acabado de los elementos que forman el cilindro debe ser precisa y superficialmente muy buena.



*Figura 9. Cilindros y camisas en un bloque motor. (Pruebaderuta.com)*

En el interior del cilindro encontramos un tubo cilíndrico, denominado camisa, está ubicado de tal manera que a su alrededor es posible el paso de refrigerante, con esta colocación, las camisas son fácilmente sustituibles, normalmente de materiales resistentes al desgaste ya que son las que se encuentran en contacto directo con el pistón. Su fabricación se lleva a cabo mediante un mecanizado de precisión, rectificado y posterior pulido. Las camisas pueden secas o húmedas en función del tipo de refrigeración que utilicen.

En las **camisas secas** el líquido refrigerante no entra en contacto con ellas directamente.

En las **camisas húmedas**, el líquido refrigerante se encuentra en contacto directo con la propia camisa. Las camisas húmedas se ajustan mediante unas juntas de estanqueidad para evitar el refrigerante pueda llegar al cárter, sobresalen ligeramente del plano superior del bloque y quedan fijadas con la culata colocada. (Giacosa)



### 2.1.2.3 Pistón

En los últimos años los motores y el diseño de sus pistones han sufrido grandes cambios, mayores a décadas anteriores. Antiguamente el diseño de los mismos se basaba en la experiencia de diseños anteriores. Los motores actuales, con potencias medias y prestaciones cada vez más altas son más exigentes con los motores en general y los pistones en particular. Para conseguir una buena durabilidad y buen rendimiento es importante prestar especial atención en el diseño, procesos de fabricación, materiales y reducción de fricción.



*Figura 10. Pistón y biela. (motorman.cl)*

Según el tipo de fabricación y materiales que utilicen pueden diferenciarse en varios grupos.



## **Según sus materiales de construcción**

El pistón debe ser diseñado de tal forma que permita una buena propagación del calor y a su vez evitar altas tensiones provocadas a altas temperaturas.

### *Aleación de níquel y hierro fundido*

Se utiliza una aleación de hierro al 64% y níquel al 36% con una concentración muy baja de carbono y algo de cromo. Gracias a esta aleación se consigue limitar la dilatación del pistón ya que el coeficiente de dilatación es prácticamente nulo.

### *Fundición*

Se utiliza para la fabricación de motores pequeños ya que se obtiene una elevada resistencia mecánica y una gran capacidad para trabajar a fricción.

### *Pistones de hierro colado*

Sufren un desgaste menor y se expanden muy poco, por esa razón pueden utilizarse con poca holgura.

### *Pistones de aluminio*

Los pistones realizados en aluminio son mucho más ligeros y tienen un coeficiente de transmisión de temperatura muy alto, por lo tanto, su refrigeración es mucho más sencilla que en otros pistones, cómo los de fundición.

### *Pistones de hierro común*

Los pistones de hierro común son utilizados para motores de baja y media velocidad, tienen buena elasticidad, por lo tanto no sufren deformaciones permanentes y resistentes al desgaste. Permite emplear espacios nocivos menores, que es muy aprovechable para grandes motores que trabajan con cargas variables.

## **Según su proceso de fabricación**

Los pistones, según su proceso de fabricación pueden ser:

- Fundidos
- Forjados

Según el tipo de motor y los esfuerzos a los que será sometido en funcionamiento se llevará a cabo mediante un método u otro. Los pistones forjados tienen mayor resistencia mecánica, también se obtienen partes del propio pistón mecanizándolas para darles su forma final, normalmente estos mecanizados se realizan con CNC (Control Numérico por Ordenador). (Rodríguez, 2017)

### *2.1.2.4 Cigüeñal*

El cigüeñal desempeña en el motor la tarea de transformar el movimiento ascendente y descendente de los pistones en un movimiento rotatorio con ayuda de las bielas, gracias al mecanismo biela-manivela. El par generado se transmite al disco volante. El cigüeñal es un eje codado, con contrapesos integrados o atornillados.



*Figura 11. Cigüeñal Emma maersk sobre bancada. (Wärtsilä.com)*

## **Fabricación**

El cigüeñal se fabrica, generalmente de acero al carbono o aceros aleados con cromo-níquel, cromo-molibdeno-vanadio, aceros de alta resistencia con procesos de fabricación específicos, etc.

### *Colada*

Para llevar a cabo la fabricación de un cigüeñal, se realiza de manera muy similar al bloque motor, se obtiene la forma bruta con un molde, en el cual, situado en posición vertical se le introduce la colada centrífuga en su interior. Una vez se enfría la pieza, se desmoldea el cigüeñal y se retira el molde sobrante. Posteriormente se realizará un post procesamiento en el que se pulirá el cigüeñal y se darán, si fuera necesario, el acabado final gracias a el mecanizado de la pieza.

### *Mecanizado*

Para realizar un cigüeñal mediante el mecanizo, en primer lugar, se aproximará la forma desde un bloque de material con las medidas relativamente cercanas al cigüeñal que queramos obtener. Para poder realizar el mecanizado de un cigüeñal será necesario utilizar un torno revolver o automático de levas. En primer lugar, se aproxima la forma del cigüeñal, devastando la pieza comenzando por el eje principal del cigüeñal. El siguiente paso es colocar la pieza obtenida de forma que se alinee con el segundo eje para devastar hasta el nivel de los cilindros posteriores. Una vez torneada la pieza de la manera requerida, se realizará una segunda fase de limado para darle un acabado perfecto.

### *Forjado*

El proceso de forjado es ideal para conseguir un cigüeñal de calidad óptima, ya que gracias a el forjado se dotará al cigüeñal de gran resistencia mecánica, para ello se realizará mediante estampación en caliente.

Para realizar la estampación es necesario diseñar la estampa y fabricarla en aceros de alta resistencia; con una alta resistencia al desgaste, duro y tenaz. Para ello se fabrica el cigüeñal en dos mitades, primero se estampa una de ellas y posteriormente la otra. Una vez acabadas ambas caras, se taladran conjuntamente para unir las mediante bulones. Finalmente se realiza un tratamiento térmico para mejorar la resistencia del cigüeñal. Se pule la pieza resultante y calibra en frío. (Rodríguez, 2017)

#### *2.1.2.5 Válvulas*

Para poder distribuir los gases de escape y admisión, el motor necesita de un elemento concreto capaz de realizar dicha función, estos elementos son las válvulas de admisión y escape de un motor. Las válvulas se abren y cierran gracias al árbol de levas, que dependiendo del punto en el que se encuentre el pistón abre o cierra una u otra válvula, permitiendo de esta manera la admisión de aire renovado al cilindro y la salida de los

gases de escape posteriores a la combustión. Las características críticas de las válvulas son cuando deben cerrar a la perfección y de esta forma, sellar el cilindro. Para ello las válvulas se encuentran "normalmente cerradas" en el asiento de la válvula. Las válvulas sufren gran desgaste ya que trabajan en temperaturas muy elevadas, que van desde los 200-300°C en las válvulas de admisión hasta los 800°C en las válvulas de escape y realizan hasta 70 ciclos por segundo. En la siguiente figura pueden observarse las distintas partes de una válvula.

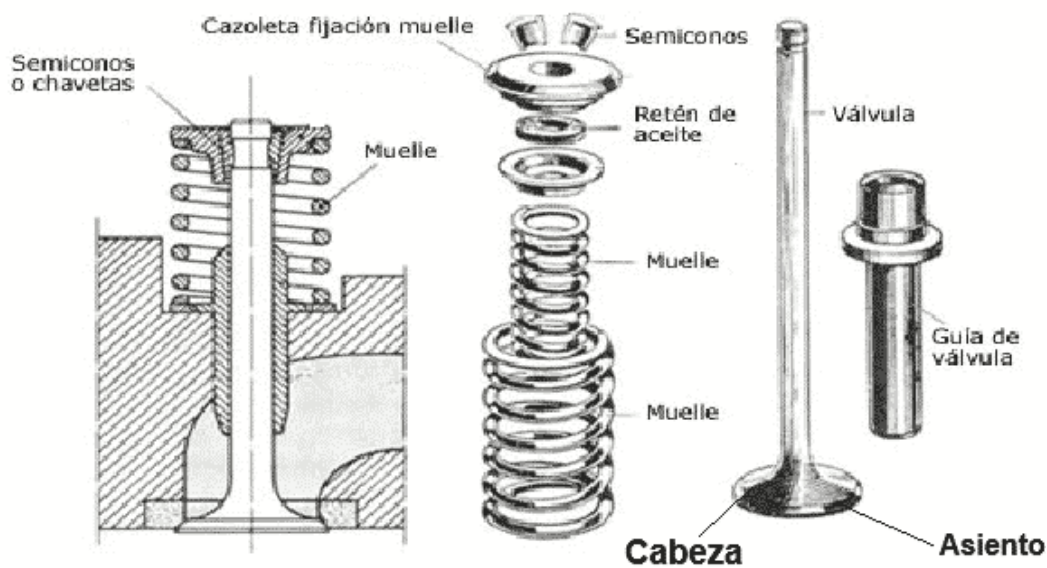


Figura 12. Esquema de una válvula. (mundodelmotor.net)

## Tipos de válvulas

Existen varios tipos de válvulas dependiendo de su fabricación:

### *Válvulas monometálicas*

Son las válvulas fabricadas mediante un proceso de extrusión en caliente, este tipo de válvulas tienen el mismo material en toda la válvula y pueden ser magnéticas o no magnéticas dependiendo del material utilizado. Pueden observarse en la siguiente figura.

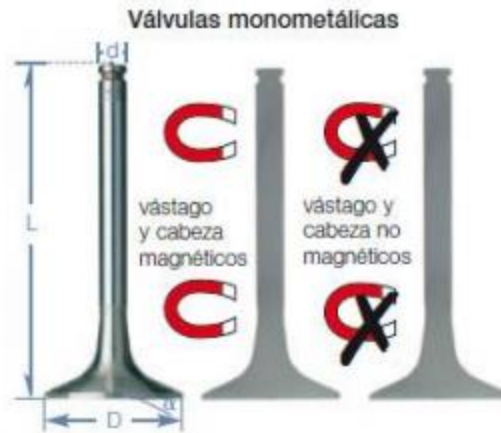


Figura 13. Válvulas monometálicas. (Mahle original)

### Válvulas bimetálicas

Las válvulas bimetálicas hacen posible la combinación de materiales ideales para el vástago y para la cabeza, de este modo puede conseguirse el vástago magnético y la cabeza puede no serlo. Pueden observarse en la siguiente figura.



Figura 14. Válvulas bimetálicas. (Mahle original)

### Válvulas huecas

Las válvulas huecas otorgan una reducción de peso y disminución de la temperatura, están rellenas de sodio, material que funde a los 97,5°C, de este modo pueden transportar el calor desde la cabeza de la válvula hasta el vástago, de este modo consiguen

reducciones de temperatura de entre 80 y 150°C. Pueden observarse en la siguiente figura.



Figura 15. Válvula hueca rellena de sodio. (Mahle original)

En la siguiente tabla pueden observarse los materiales utilizados para la fabricación de válvulas. (Mahle)

Tabla 1. Materiales de fabricación de las válvulas. (Mahle original)

Nomenclatura	Descripción
<b>CS</b>	Acero bajo carbono para válvulas de admisión. Utilizada para el vástago en válvulas bimetálicas
<b>M</b>	Acero cromo silicio para válvulas de admisión y escape en servicios moderados. Utilizada para el vástago en válvulas bimetálicas
<b>MN</b>	Acero cromo níquel silicio para válvulas de admisión con gran resistencia a la corrosión y temperaturas elevadas.

<b>MV</b>	Acero cromo molibdeno vanadio para válvulas de admisión con alta resistencia al desgaste, corrosión y altas temperaturas.
<b>A</b>	Acero austenítico cromo níquel manganeso para válvulas de escape resistentes a pesadas condiciones de operación.
<b>AN</b>	Acero austenítico cromo níquel para válvulas de escape resistentes a severas condiciones de operación.
<b>AB</b>	Acero austenítico cromo níquel manganeso para válvulas de escape resistentes a pesadas condiciones de operación.
<b>X</b>	Super aleaciones para válvulas de escape fuertemente solicitadas.
<b>ST</b>	Altas aleaciones de blindaje del asiento de válvulas de alta resistencia a la oxidación, desgaste y corrosión.
<b>SH</b>	Válvula con asiento temperado.
<b>N</b>	Válvula nitretada
<b>CP</b>	Válvula con vástago cromado



### *2.1.2.6 Culata*

La culata, también conocida como tapa de cilindros, tapa del bloque, cabeza del motor es la parte superior de un motor de combustión y consigue cerrar la cámara de combustión, en la culata se sitúan conductos de refrigeración, las válvulas, el tren de balancines, orificios o lumbreras para la salida de gases de escape o entrada del aire de admisión, orificios para los inyectores o roscados para las bujías.

La fabricación de la culata se realiza en hierro fundido, aluminio u otras aleaciones ligeras y se une al bloque mediante pernos, sellando entre ellos la junta de culata. La fabricación de la culata se realiza del mismo modo que el bloque motor, en primer lugar, se realiza un molde de una mezcla de arena en el interior del cual se depositará el metal fundido.

Una vez enfriado, se retira el molde, se eliminan los restos de arena de la culata y se realizan los mecanizados pertinentes, posteriormente se pule para conseguir el acabado deseado. (Rodríguez, 2017)

Algunos de los mecanizados que pueden realizarse son:

- Fresado
- Taladrado
- Roscado
- Escariado
- Taladrado profundo



*Figura 16. Culata motor 4 cilindros. (técnica del motor blog)*

### 2.1.2.7 Cáster

El cáster es una pieza metálica que se aloja en la parte inferior del motor, es un recipiente en que se alojan elementos operativos del motor. El cáster actúa como depósito de aceite y cierre de la parte inferior del motor. El aceite que cae de los pistones caliente se refrigera en el cáster, por lo tanto, también actúa como elemento refrigerante.

El cáster suele estar fabricado con chapa de acero o aleaciones de aluminio, que consiguen disipar el calor más rápidamente. El cáster protege al motor de agentes externos que pudieran mermar las capacidades del mismo.

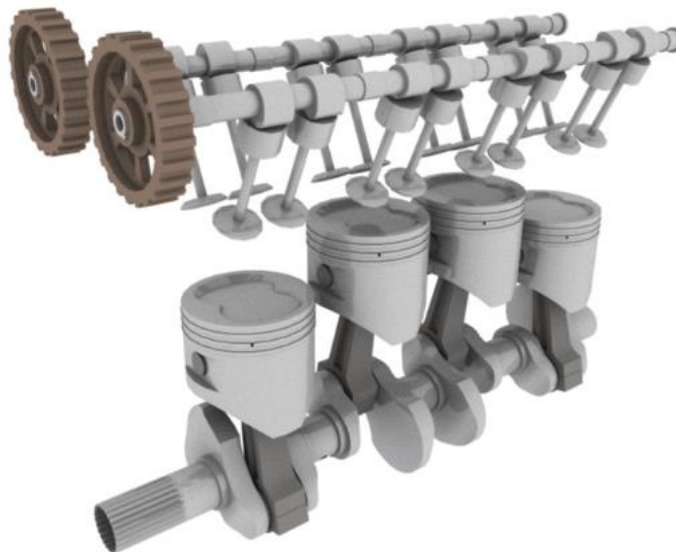
La fabricación del cáster se realiza por fundición y posterior mecanizado, aunque también existen variables de fabricación para el cáster con prensa hidráulica y posterior mecanizado de los elementos más críticos.



*Figura 17. Carter. (mechanicsdrags.com)*

### *2.1.2.8 Árbol de levas*

El árbol de levas es el encargado de abrir las válvulas en el momento adecuado, actualmente se están llegando a sustituir por válvulas electrónicas o válvulas neumáticas, igualmente siguen siendo usados en la gran mayoría de los motores. Un árbol de levas es un cilindro longitudinal en el que a lo largo de su propio eje se posicionan de manera estratégica unas protuberancias en forma de lóbulo que son las encargadas de desplazar el vástago de las válvulas para abrirlas en el momento adecuado gracias a un mecanismo intermedio.



*Figura 18. Representación de árbol de levas en funcionamiento. (motorgiga.com)*

## **Fabricación**

La fabricación del árbol de levas se lleva a cabo mediante 2 procesos distintos.

### *Fundición*

Del mismo modo que ocurría con otras partes del motor, el árbol de levas sigue el mismo procedimiento de fabricación. Mediante la fundición de hierro u otros materiales.

Se realiza un molde en el cual se introduce la colada, una vez enfriado el mismo se retira el molde y se realiza un post procesado a la pieza para conseguir un mejor acabado en la misma.

### *Mecanizado*

Cuando se requiere un árbol de levas de alta calidad o una producción de bajo volumen, el árbol de levas se realiza mecanizando material a partir de un cilindro más grande, es un proceso costoso y largo. El proceso de mecanizado se realiza mediante un torno de control numérico y con fresadoras CNC, cuando se obtiene la forma de todas las partes y son ensambladas se realiza un acabado superficial y posteriormente un tratamiento físico y químico para que el propio metal adquiera mayor resistencia a la abrasión (dureza superficial) y resistencia mecánica. (Rodríguez, 2017)

## Capítulo 3: La impresión 3D

La impresión 3D es una de las grandes tendencias de los últimos años en el terreno tecnológico. De hecho, estamos viendo poco a poco como salen al mercado de consumo distintos modelos de impresora 3D que se puede comprar tanto a través de Internet como en tiendas de electrónica.

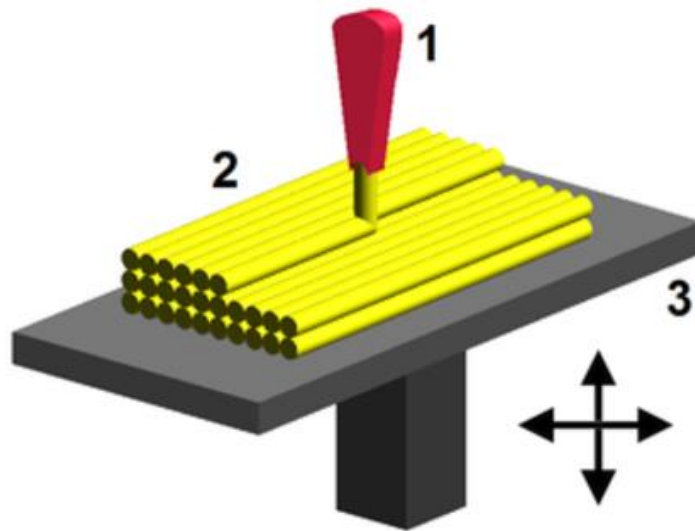
Las impresoras 3D forman parte de lo que se conocen como procesos de fabricación aditiva. Estos procesos son aquellos que permiten fabricar un objeto desde cero donde las máquinas van añadiendo material hasta conformar la pieza final.

En la fabricación tradicional como puede ser el mecanizado mediante control numérico se parte de un bloque de material sobre el que se empiezan a realizar operaciones quitando capas hasta dejar la pieza que se quiere obtener.

Los procesos aditivos incluyen, entre otros, todas las tecnologías de Prototipado Rápido (*Rapid Prototyping*) con métodos como la impresión 3D: FDM, FFF, Estereolitografía (SLA) o el Sinterizado Selectivo Láser (SLS).

Todos los procesos de fabricación aditiva tienen en común el hecho de que pueden generar geometrías muy complejas de una forma muy rápida. En todos los casos, los objetos presentan una textura material de capas muy finas, casi imperceptibles.

La tecnología que ha popularizado este método de impresión de figuras y piezas en 3D ha sido la que se conoce como *Fusion Deposition Modeling* (FDM). El principio patentado de la tecnología 3D es el siguiente:



1. Extrusor / 2. Material depositado / 3. Ejes de movimiento

*Figura 19. Tecnología de impresión 3D FDM.*

Es una tecnología que permite conseguir piezas utilizando plástico ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) o bien PLA (Ácido poliláctico) (un polímero biodegradable que se produce desde un material orgánico).

Con el paso de los años se han descubierto nuevas tecnologías para la impresión 3D que consiguen mejorar los acabados de las piezas y mejorar sus propiedades mecánicas. Con estas innovaciones se podrían llegar a sustituir ciertos métodos de fabricación actuales en diversas disciplinas. (Pascual, 2017)

### 3.1 Historia

El inicio de la impresión 3D se remonta a 1976, con la aparición de la impresión de inyección de tinta. Desde ese momento, la tecnología ha ido evolucionando para llegar a

la impresión con materiales, la impresión 3D ha sufrido cambios durante décadas en diferentes ramas de la industria. En 1984, Charles Hull inventó el método de estereolitografía (SLA), era un proceso de impresión encarado a la realización de maquetas para probar prototipos antes de llevarlos a cadena de montaje (una de las utilidades actuales). Ese mismo año creó la empresa 3DSystems, de este modo se permitió el uso a nivel industrial del proceso de impresión 3D. Posteriormente en 1990, Scott Crump fundó Stratasys desarrollando una nueva tecnología de impresión 3D, FDM (*Fused Deposition Modeling*), con la cual se conseguían crear objetos tridimensionales gracias a la superposición de capas de material, que se fundían las unas con las otras para, al enfriarse, solidificarse la unión. Con el tiempo, esta tecnología permitió el abaratamiento de costes y consiguió llegar a empresas más pequeñas o incluso a algunos usuarios.

A finales de los noventa, dos estudiantes del MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) consiguieron desarrollar una impresora 3D, adaptando una impresora de inyección de tinta, fundaron una empresa, Z Corporation, que más tarde fue adquirida por 3DSystems.

Marcó el punto de inflexión en el abaratamiento de la tecnología y en consecuencia la llegada de la misma a usuarios comunes. Ello se dio gracias a el proyecto RepRap, que por medio del Dr. Bowyer, desarrollo la primera impresora en 3D en la cual podían imprimirse prácticamente todas sus piezas, de esa manera cualquier persona podría tener una de una manera relativamente sencilla.

Seguí existiendo el problema de que, un usuario común, podía no ser capaz de montar su impresora, nace Makerbot con la idea de comercializar impresoras 3D con el concepto de RepRap y que se pudieran montar por cualquiera con unos sencillos planos, llegaron a distribuir hasta 6000 unidades. (Pascual, 2017)

### 3.1.1 Cronología

A continuación, se relata una cronología de los hitos de la impresión 3D.

Tabla 2. Cronología Impresión 3D. (Biblioteca GC)

AÑO	SUCESO/HITO
1984	Charles Hull inventa el SLA.
1986	Charles Hull patenta su invento y crea 3D Systems.
1987	Carl Deckard desarrolla el sinterizado selectivo por láser (SLS).
1988	Scott Crump inventa el modelado por deposición fundida (FDM). 3D Systems comercializa su primera impresora 3D.
1990	EOS vende su primer sistema "Stereos".
1992	Stratsys patenta la tecnología FDM.
1993	Un grupo de estudiantes del MIT desarrollan la tecnología de impresión por inyección (3DP)
1995	Z Corporation obtiene la licencia de 3DP
1996	Z Corporation vende su primera impresora 3DP
1999	El instituto de medicina regenerativa de la Universidad de Wake Forrest implanta en humanos los primeros implantes arteriales impresos en 3D.



<b>2000</b>	MCP Technologies introduce la tecnología de fusión selectiva por láser (SLM)
<b>2002</b>	El instituto de medicina regenerativa de la Universidad de Wake Forrest imprime el primer riñón completamente funcional.
<b>2005</b>	1º Proceso aditivo basado en tecnologías de soldadura por haz de electrones. Adrian Bowyer funda RepRap.
<b>2006</b>	Primera máquina de SLS. Primera máquina capaz de imprimir en varios materiales. Primera impresora de código abierto.
<b>2007</b>	Primer sistema de impresión 3D, por menos de 10000\$.
<b>2008</b>	Se lanza la primera impresora capaz de auto replicarse. Primera prótesis de pierna impresa en 3D
<b>2009</b>	Primer kit de montaje en casa de una impresora 3D.
<b>2010</b>	Primer almacén de coche impreso en 3D. Primeros vasos sanguíneos impresos en 3D con bio impresión.
<b>2011</b>	Impresora 3D de alimentos. Primer avión no tripulado impreso en 3D.

<b>2012</b>	Primer implante de mandíbula impresa en 3D. Anunciada la "litografía de dos fotones".
<b>2013</b>	Primera prótesis de mano. Fabricación aditiva en motores a reacción. Primer arma de fuego impresa en 3D.
<b>2014</b>	Pelvis impresa en 3D. Primera venta de tejidos humanos bio impresos. Impresora 3D capaz de construir casas. Tecnología MultiJetFusion de HP. Impresora 3D capaz de crear objetos sin gravedad enviada a la Estación Espacial Internacional.
<b>2015</b>	Autorizado el primer medicamento fabricado con impresión 3D. Nervio ciático impreso en 3D probado en ratones. Prótesis para animales impresas en 3D
<b>2016</b>	Nueva tecnología de impresión 3D de cerámica. Impresión 3D con nanotecnología. Bicicleta de acero impresa en 3D. Nueva tecnología por inyección de metal líquido. Pequeño autobús fabricado en 3D.

<b>2017</b>	<p>Escáner 3D en 360°.</p> <p>Filamentos reciclados con pellet y algas marinas.</p> <p>Impresora de Markforged capaz de imprimir metales.</p>
<b>2018</b>	<p>HP anuncia la fabricación de una impresora 3D de metales con Multi Jet Fusion y otra con costes asequibles a pymes.</p> <p>BMW presenta un prototipo de motocicleta impresa íntegramente en 3D.</p> <p>EEUU comienza el desarrollo de explosivos impresos en 3D.</p>

## 3.2 Tecnologías de impresión 3D actuales

Actualmente existen varias tecnologías de fabricación mediante impresión 3D en el mercado, normalmente impulsadas por empresas concretas o varias de ellas. Se examinarán en detalle las capaces de imprimir metales y por tanto utilizables para imprimir componentes de motores.

### 3.2.1 Fotopolimerización

La fotopolimerización es una tecnología para impresión en tres dimensiones que se basa en el principio de utilización de luz para realizar el curado y uniones entre las capas del material a imprimir, dentro de la fotopolimerización existen tres tecnologías con sus características principales descritas en la siguiente tabla.

Tabla 3. Tabla características fotopolimerización

Nombre de la tecnología	Material	Características	Empresas que la utilizan
<b>SLA</b> (estereolitografía)	Plástico (Resinas)	Curado mediante láser	3DSystems, Formlabs, DWS
<b>DLP</b> (Procesamiento digital de luz)	Plástico (Resinas)	Curado con un proyector	Envisiontec, B9 creator
<b>CDLP</b> (Procesamiento digital de luz continuo)	Plástico (Resinas)	Curado con LED y oxígeno	Carbon3D, Envisiontec

### 3.2.1.1 Estereolitografía o SLA

La estereolitografía fue la primera tecnología de impresión 3D, patentada por Chuck Hull. Esta tecnología es un proceso de fabricación por adición, para ello se emplea resina que es curada mediante un haz de luz ultravioleta en un tanque y un láser ultravioleta para construir los objetos. Estos objetos se obtienen mediante la adición capa a capa donde el láser va trazando los puntos exactos dónde se requerirá la pieza. La resina líquida se cura y se solidifica gracias al láser de luz ultravioleta. Los movimientos en el eje vertical se realizan gracias al movimiento de la plataforma base, se desplaza en sentido descendente para que la propia pieza crezca. (3dnatives)

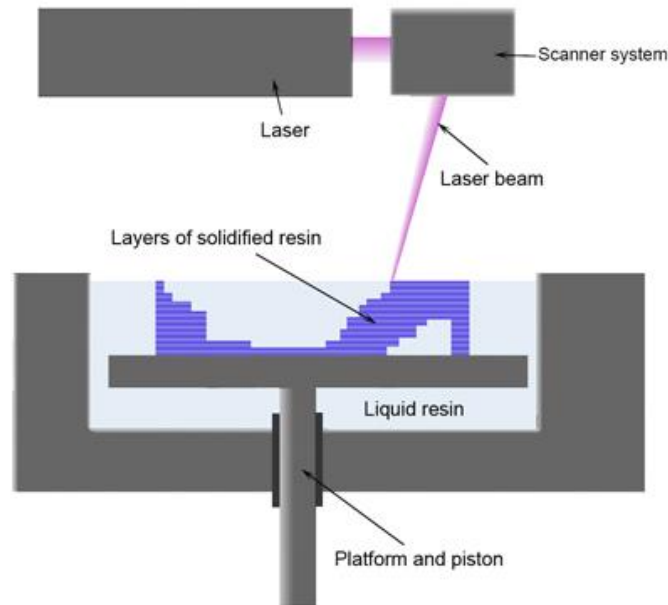


Figura 20. Esquema de funcionamiento de la estereolitografía. (Materialgeez)

### 3.2.1.2 DLP y CDLP

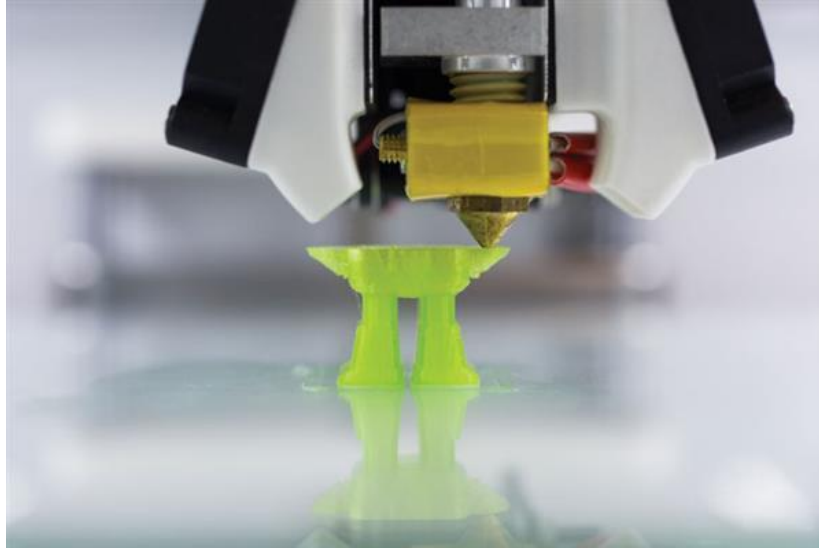
El principio de estas dos tecnologías es el mismo que en la estereolitografía, con la diferencia que el curado se realiza con lámparas.

En el CDLP, el curado se realiza mediante luces LED y con ayuda de oxígeno.

### 3.2.2 Extrusión de material

Es la tecnología de impresión 3D más extendida para uso común, ya que tiene un coste muy bajo comparado con sus competidores.

El nombre de la tecnología utilizada es **FDM** (Modelado por Deposición Fundida), su funcionamiento se basa en la fusión del material a depositar, normalmente termoplásticos con temperaturas de fusión bajas, el material se deposita sobre la base en pequeños filamentos de unos 0,3 mm a través del extrusor. El extrusor puede desplazarse en tres ejes, la pieza se realiza capa a capa.



*Figura 21. Extrusor de una impresora FDM.*

Es una tecnología muy flexible ya que es capaz de realizar piezas muy diversas. Actualmente se utilizan varios materiales en ese proceso de fabricación:

- ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno)
- PLA (Poliácido láctico)
- Policarbonato
- PCL (Policaprolactona)
- PPSU (Polifenilsulfona)
- PEI (Polieterimida)
- PVA (Acetato de polivinilo)
- Ceras
- Composites
- Chocolates y otros alimentos

Esta tecnología está muy extendida, es la usada para las impresoras 3D domésticas, empresas que utilizan esta tecnología de un modo más industrial son:

- Stratasys (su inventora)
- Ultimaker

- MakerBot
- Markforged

### 3.2.3 Inyección de material

La tecnología de inyección de material, también es conocido como “moldeo a la cera perdida”, es una técnica utilizada por los joyeros desde hace siglos, es un proceso de producción que permite fabricar joyas personalizables de alta calidad con varios metales, con la impresión 3D se ha conseguido automatizar este proceso.

La cera fundida se deposita en capas sobre una superficie de aluminio mediante varias boquillas que recorren el área de impresión. Al entrar en contacto con la superficie de la impresora, el material se solidifica. La cera moldeable es muy frágil, comienza a ablandarse a partir de los 60°C y funde sobre los 80°C. (3dnatives)

Dentro de la inyección de material existen 3 tipos de tecnologías, quedan definidas en la siguiente tabla:

Nombre de la tecnología	Material	Características	Empresas que la utilizan
<b>MJ</b> (Inyección de material)	Plástico	Curado con lámparas UV	Stratasys
<b>NPJ</b> (Inyección de nanopartículas)	Metales	Curado con calentador	XJET
<b>DOD</b> (Material según demanda)	Cera	Extraído para moldear	Solidscape

### 3.2.4 Aglutinante

La realización de modelos y prototipos de motores con medio convencionales era costosa hasta la llegada de la impresión 3D.

Mediante la utilización de una impresora 3D pueden realizarse moldes de arena (silicatos) de alta calidad de una manera sencilla y barata. Empresas como ExOne y Voxeljet llevan desde 2003 desarrollando este tipo de impresoras. La tecnología utilizada añade aglutinantes a los silicatos para obtener la forma deseada, esta tecnología se denomina BJ (*Binder Jetting* por sus siglas en inglés).

En la fabricación de motores, automoción como otros sectores como el marítimo, se ha tendido a seguir siempre un patrón uniforme y sin grandes innovaciones. Las nuevas tecnologías como son la impresión 3D están consiguiendo que los grandes fabricantes den el salto y experimenten con nuevas opciones.

En el sector de la automoción en concreto compañías como BMW, Volkswagen y Ford están actualmente experimentando con nuevos prototipos de motores realizados mediante la impresión 3D, impresión 3D de moldes de arena con los que posteriormente, por medio de la fundición, se realiza la pieza deseada.

Todo esto está siendo aplicado para la realización de prototipos antes de llevar la pieza a producción o para producción de pequeñas series. Otra de las ventajas de la impresión 3D para los moldes de arena de las piezas es que al imprimir el molde, puede realizarse de una sola pieza sin necesidad de que sea desmoldable.

Otras empresas como Mercedes, Porsche, Volvo y las anteriormente citadas están usando la impresión 3D para realizar prototipos o pequeñas series de piezas plásticas mediante la utilización de otras tecnologías de impresión. De este modo pueden llegar a

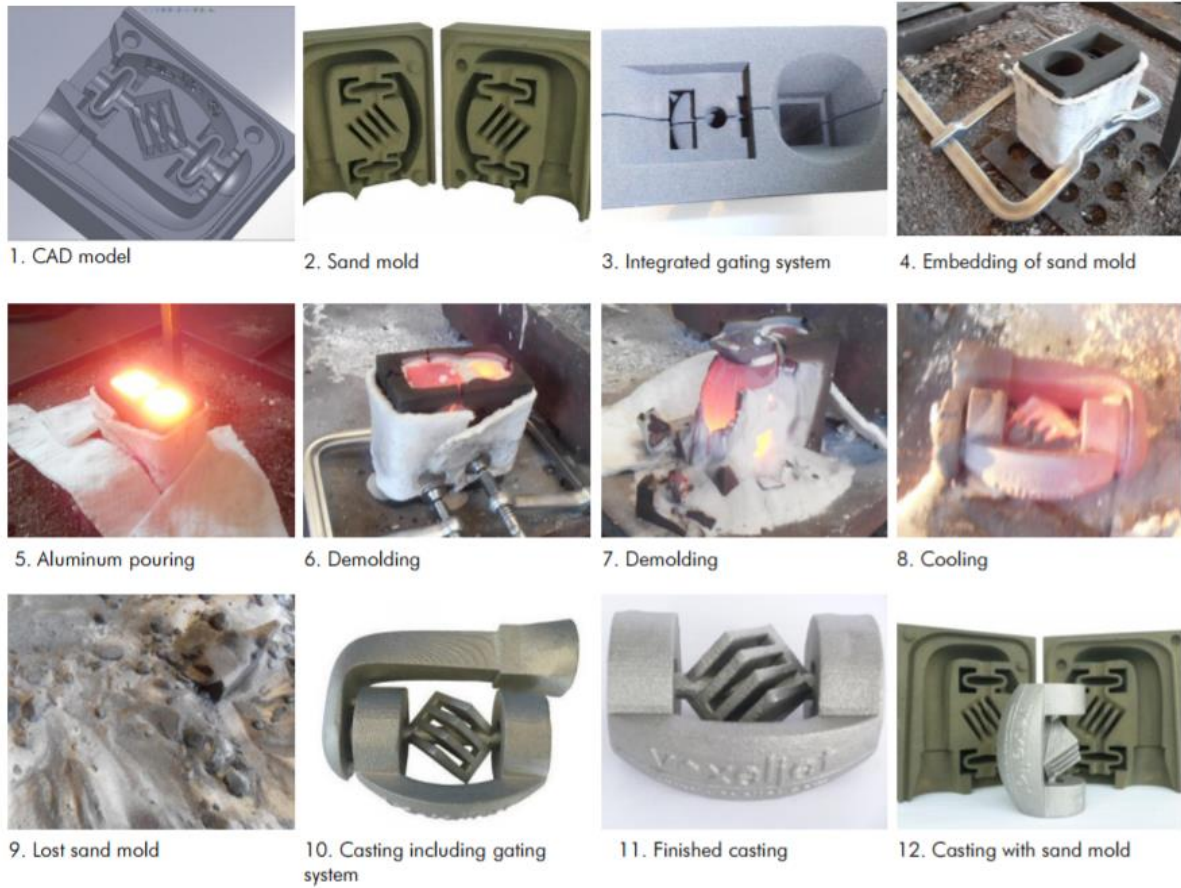


personalizar cada vehículo de manera independiente sin necesidad de producir en serie dichas piezas.

Existen dos modos distintos de realizar piezas de motores a través de la impresión 3D de moldes de arena. La realización de un molde negativo directamente imprimiendo dicho molde, o realizar un molde negativo a partir de un modelo impreso en materiales plásticos. A continuación, se detallan ambos procesos:

Pieza realizada con un molde negativo impreso directamente:

1. Diseño digital del molde (CAD)
2. Impresión del molde (2 partes)
3. Ensamblado del molde
4. Fijación del molde
5. Añadimos el material (en este caso aluminio) fundido
6. Una vez solidificado se procede al desmolde
7. Enfriamiento de la pieza
8. Pieza finalizada



*Figura 22. Proceso de fabricación de una pieza metálica mediante un molde impreso en arena. (VoxelJet)*

Pieza realizada con un molde negativo impreso directamente:

1. Diseño digital de la pieza final (CAD)
2. Impresión de la pieza (Plástica)
3. Fijación de la pieza
4. Tratamiento cerámico y sílices (varias capas)
5. Horneado del conjunto para fundir y eliminar el plástico de la pieza y tratar el molde
6. Fijación del molde
7. Colada del metal (aluminio de nuevo)
8. Rotura del molde
9. Enfriamiento de la pieza
10. Pieza finalizada

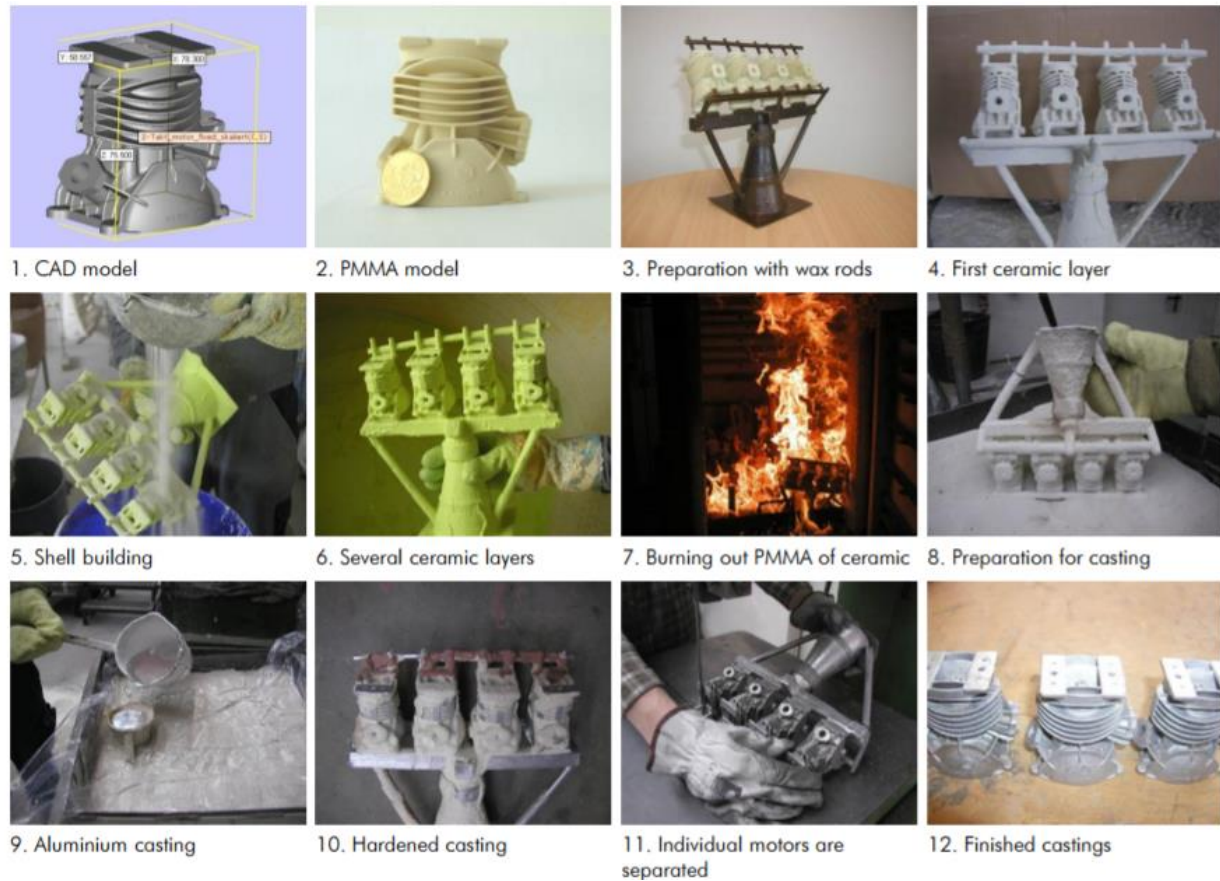


Figura 23. Proceso de fabricación de una pieza metálica mediante la impresión de una pieza plástica. (Voxeljet)

### 3.2.5 Fusión por lecho de polvo

La tecnología de fusión por lecho de polvo, PBF (*Powder bed fusión*) es una técnica de fabricación aditiva basada en la deposición de sucesivas capas de material en polvo para fundirlas por una fuente de energía, se utilizan tanto materiales plásticos como metálicos.

Comparándola con otras tecnologías de fabricación aditiva, la fusión por lecho de polvo destaca por hacer posible la fabricación de piezas metálicas de aleación de titanio o níquel. Las piezas producidas con esta tecnología obtienen una estructura interna muy consistente. En la siguiente tabla pueden observarse las distintas tecnologías para la fusión por lecho de polvo.

Tabla 4. Comparativa tecnologías de fusión por lecho de polvo

Nombre de la tecnología	Material	Características	Empresas que la utilizan
<b>MJF</b> (Multi Jet Fusion)	Plástico	Fundido con un agente y energía	HP
<b>SLS</b> (Sinterización selectiva por láser)	Plástico	Fundido por láser	EOS, 3DSystems
<b>DMLS/SLM</b> (Sinterización directa por láser en metal/Fusión selectiva por láser)	Metales	Fundido por láser	EOS, 3DSystems
<b>EBM</b> (Fusión por haz de electrones)	Metales	Fundido por haz de electrones	Arcam

### 3.2.5.1 Multi Jet Fusion (MJF)

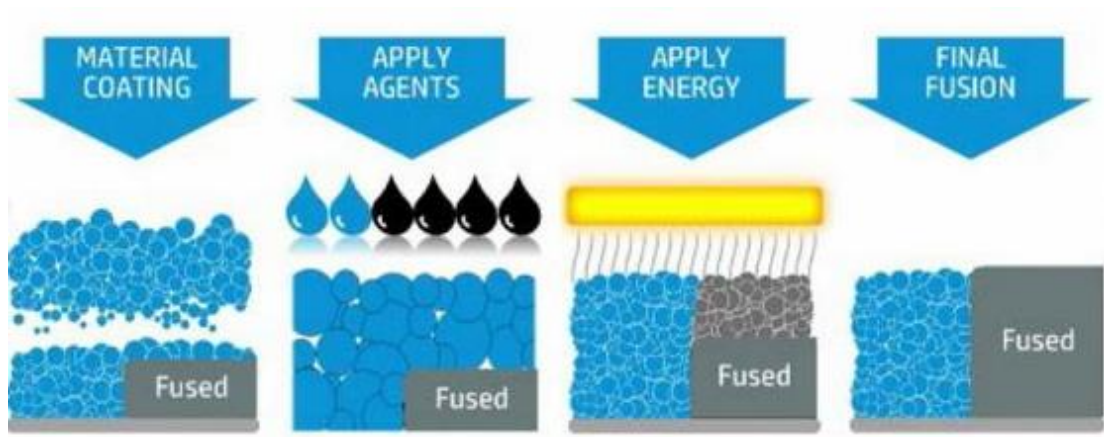
La tecnología ideada por HP consigue imprimir de una manera más rápida y eficaz gracias a que consigue imprimir por capas enteras en cada pasada, toda la superficie del área de impresión. En el proceso de impresión en primer lugar se deposita el polvo requerido, posteriormente se añade un agente aditivo en la zona a imprimir para posteriormente aplicar energía mediante unas lamparas. Al aplicar calor sobre la zona de impresión el agente reacciona con el polvo fundiéndolo, se repite el proceso tantas veces como capas tenga la pieza, de esta manera cada capa se funde con la anterior creando la pieza final.

Se consiguen acabados como los de la figura:



*Figura 24. Engranajes impresos con Multi Jet Fusion. (Hp.com)*

Cómo se aprecia en el gráfico siguiente el polvo sobrante no se funde, una vez acabada la impresión de la pieza puede reaprovecharse y reciclarlo realizando una mezcla de polvo nuevo y reutilizado.



*Figura 25. Funcionamiento Multi Jet Fusion. (hp.com)*

### *3.2.5.2 Sinterización selectiva por láser (SLS)*

La tecnología de sinterización selectiva funciona de manera similar a MJF, la gran diferencia es que a la hora de fundir el material (polvo), debe ir punto por punto hasta realizar la pieza. El sinterizado selectivo por láser puede realizar las piezas sin necesidad



de recurrir a agentes aglutinantes. Cada uno de los dos recipientes, uno se eleva mientras el otro baja de ese modo el material de uno de los recipientes pasa al otro. El polvo se introduce de un recipiente al otro gracias al rodillo intermedio que en cada pasada va desplazando el material necesario para la siguiente capa. El rayo laser recorre la capa depositada provocando la fusión y consolidación del polvo.

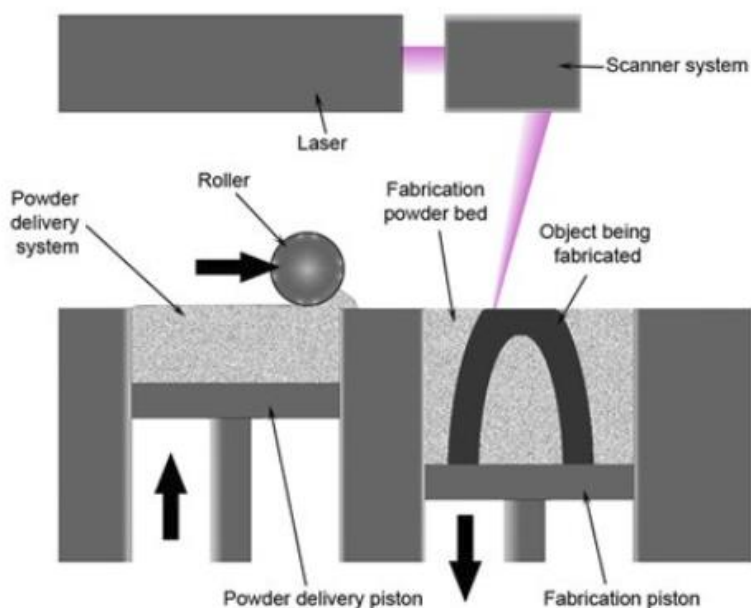


Figura 26. Funcionamiento SLS. (tth.com)

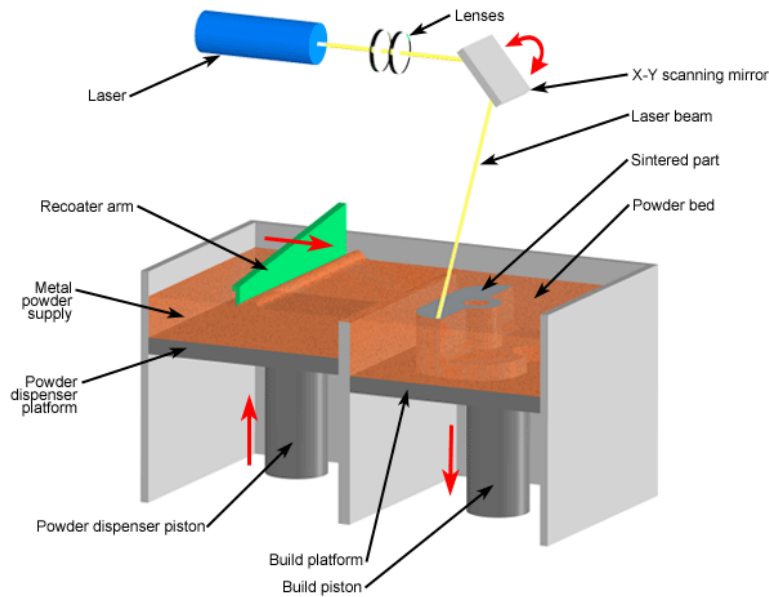
### 3.2.5.3 Sinterización directa por láser (DMLS/SLM)

El sinterizado directo de metal por láser, fue patentado en 1994 su funcionamiento es similar al de SLS, pero con la necesidad de aplicar más potencia.

La plataforma en la cual es realizada la impresión está compuesta por 2 recipientes, cada uno de ellos se mueve gracias a la acción de un pistón. El primero está recubierto de polvo metálico mientras el segundo se encuentra vacío, en primer lugar, se añade una fina capa de polvo al recipiente vacío, a partir de ese momento el láser de fibra óptica de entre 200 y 400W de potencia fusiona el polvo metálico, cuando se finaliza una capa se procede



con la siguiente hasta conseguir la pieza requerida. En la siguiente figura pueden apreciarse las diferencias, muy pocas, con el funcionamiento de la tecnología de SLS.



*Figura 27. Sinterizado directo de metal por láser. (3dnatives.com)*

### 3.2.5.5 Fusión por haz de electrones (EBM)

Actualmente solo Arcam utiliza esta tecnología, se consiguen piezas con formas que no sería posible conseguir de ninguna otra manera y adquieren resistencias equivalentes a piezas fabricadas por métodos convencionales. El funcionamiento de esta tecnología es muy cercano a la fusión selectiva por láser, la materia prima de esta impresora es polvo que se precalienta hasta fundirlo y se deposita en la pieza en forma de finas capas en el lugar que se requiera para la construcción de la pieza, la fabricación se realiza capa a capa repitiendo el proceso tantas veces como sea necesario para obtener la pieza final.

Las diferencias con la fusión selectiva por láser residen en el láser contra el haz de electrones, que consigue una definición menor por el tamaño del haz respecto al láser. Otra de las características principales del EBM es que requiere de materiales conductores de la electricidad para funcionar correctamente, de hecho, Arcam solo garantiza su funcionamiento con aleaciones de titanio y de cromo-cobalto, el resto deberían

comprobarse previamente en sus laboratorios. A continuación, se muestra un álabe de turbina impreso mediante esta tecnología. (Arcam)



*Figura 28. Álabe de turbina de baja presión realizado con EBM. (arcam.com)*

### 3.2.6 Deposición de energía directa (DED)

La tecnología de deposición de energía directa se basa en la adición de material, del mismo modo que en la tecnología FDM para plástico, usando metales como materia prima. Dentro de este grupo existen dos tecnologías diferenciadas; LENS (*Laser Engineering Net Shape*) y EBAM (*Electron Beam Additive Manufacturing*), las diferencias principales entre ellas son que la tecnología LENS funde el material por medio de un láser y el EBAM lo hace gracias a un haz de electrones. Con la tecnología de deposición de energía directa, es posible crear piezas desde cero, del mismo modo que en otras tecnologías de impresión 3D. Gracias a la aportación de material, son capaces de realizar reparaciones en piezas ya creadas. A continuación, se detalla el funcionamiento de ambas. (Loughborough)

### *3.2.6.1 Ingeniería laser en forma neta (LENS)*

La tecnología LENS, deposición de material gracias al laser, fue desarrollada por Optomec en 1998, realiza la fundición del material aportado y lo funde con la capa anteriormente depositada gracias a un rayo láser. Es un proceso de impresión 3D complejo, ya que requiere de altas temperaturas y movimientos precisos. La máquina está compuesta por una boquilla sobre un brazo multi eje, de 4 a 5, que deposita el material fundido sobre la superficie especificada donde se solidifica al enfriarse. Este proceso puede utilizar materiales poliméricos o cerámicos, aunque normalmente se utilizan metales en forma de alambre o polvo.

El extrusor se mueve alrededor de un objeto fijo depositando el material sobre la superficie requerida, fundido gracias a un láser, se repite el proceso capa a capa hasta conseguir los resultados deseados. El proceso se realiza en una cámara con contenidos muy bajos o nulos de oxígeno. El enfriamiento del material una vez fundido es muy rápido, entre 1000 y 5000°C por segundo. Cada capa tiene grosores de entre 0,25 y 0,5mm. Puede trabajar con materiales como el cromo, cobalto, acero y aluminio.

### *3.2.6.2 Fabricación aditiva por haz de electrones (EBAM)*

La Fabricación aditiva por haz de electrones funciona de forma similar a LENS, con la diferencia que la fusión del material se realiza mediante un haz de electrones, un proceso similar a la soldadura, pero controlado con movimientos en hasta 5 ejes.

La tecnología EBAM no es capaz de trabajar con materiales no metálicos como si pasa con el LENS. La deposición de material se realiza gracias a un haz de electrones que es capaz de fundir el material base y el aportado para unirlos, creando una unión estructuralmente muy buena. Los acabados son relativamente buenos, dependiendo de su aplicación se realiza un post procesado a la pieza en las zonas susceptibles de ellos.

Esta tecnología es capaz de imprimir metales raros como el titanio y el tántalo, a parte de los más comunes como el cromo, cobalto, acero o aluminio. Una de las peculiaridades de estas máquinas es que, gracias a su funcionamiento, pueden realizarse máquina de gran tamaño para aplicaciones concretas que requieran de un mayor volumen de impresión. La empresa que desarrolló la tecnología EBAM es Sciaky, establecida en 1939, suministradora de sistemas de soldadura para aviones estadounidenses en la Segunda Guerra Mundial. En la siguiente figura se puede apreciar el tamaño de fabricación que es capaz de otorgar esta tecnología. (Sciaky)



*Figura 29. Pieza metálica impresa por Sciaky. (Sciaky.com)*

### 3.2.7 Otras tecnologías

#### *3.2.7.1 Laminado de hojas*

En la industria de la impresión 3D actualmente existen otras formas de conseguir piezas en tres dimensiones, tecnologías como LOM (Fabricación por Laminación de Objetos)

consiguen realizar piezas en 3D gracias a la adición de capas de material y el mecanizado de los mismos, utilizan materiales como el papel, finas láminas de acero o aluminio y composites. Llevado a cabo por empresas como Mcor o Envisiontec. (Helisys)

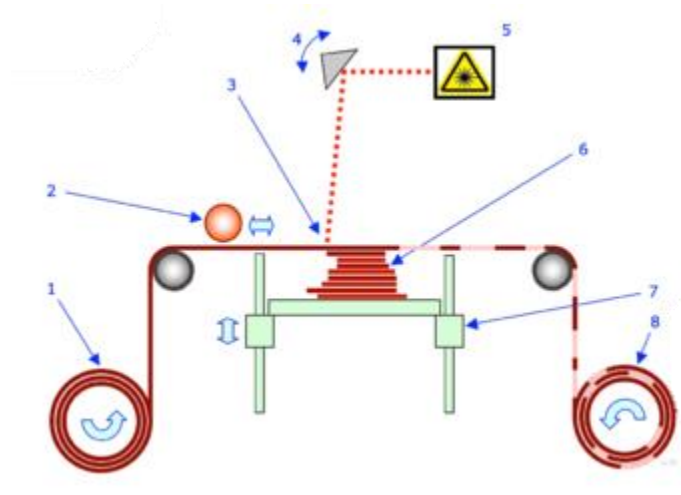


Figura 30. Funcionamiento de la tecnología LOM. (Helisys.com)

### 3.2.7.2 Inyección simple (SPJ)

Es una tecnología desarrollada por Desktop Metal, SPJ (*Single Pass Jetting*, por sus siglas en inglés) se lleva a cabo por la adición de material polvo en una superficie con un adhesivo, gracias a este adhesivo las capas se adhieren entre ellas formando una pieza primitiva, pero con la forma de la pieza final, el proceso se realiza como en otras tecnologías de impresión 3D, capa a capa hasta obtener el resultado deseado.

Una vez se obtiene la forma de la pieza, se calienta a altas temperaturas en un horno, incluido en la propia máquina, de tal manera que el material adhesivo se evapora y el polvo de material se funde capa con capa conformando de esta manera la pieza final.

Es una tecnología relativamente barata y rápida que consigue resultados de gran calidad y con propiedades mecánicas correctas.

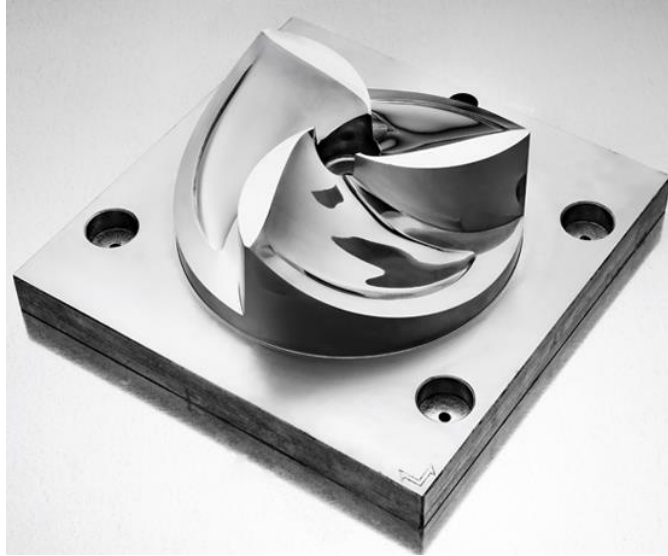
### *3.2.7.3 Otras tecnologías de adición de material directa*

Existen dos tecnologías, relativamente nuevas que podríamos clasificar dentro del grupo de deposición de energía directa, aunque sus propios fabricantes quieran desmarcarse de este grupo. Estas tecnologías son DMT (Direct Metal Tooling), de Insstek y LDWM (*Laser Deposition Welding and Milling*) de DMG Mori. Ambas tecnologías usan el concepto de deposición de material mediante láser.

#### **DMT (*Direct Metal Tooling*)**

La tecnología DMT desarrollada por Insstek, es capaz de imprimir piezas en distintos materiales, concretamente hasta 3 materiales distintos en una sola pieza, del mismo modo es posible realizar aleaciones de dichos materiales en una pieza durante la impresión. Para ello dispone de tres depósitos para almacenar la materia prima a imprimir y la propia máquina es capaz de gestionar la cantidad de cada material aportada en cada momento.

Para la fusión del material utiliza un potente láser de entre 1 y 2kW, el proceso de fabricación se realiza capa a capa, el extrusor de 5 ejes se desplaza a través del volumen de impresión para conseguir la forma deseada. Esta tecnología puede ser utilizada para la reparación de piezas ya que funde la capa anterior con la depositada. Los materiales utilizados son: hasta 6 aceros distintos, cobre, bronce, aluminio, titanio, níquel y Cobalto. Con los que pueden realizarse las aleaciones necesarias para cada caso de tal manera que se consigan propiedades mecánicas excelentes. (Insstek)



*Figura 31. Pieza realizada con la tecnología DMT (insstek.com)*

### **LDWM (*Laser Deposition Welding and Milling*)**

La tecnología LDWM desarrollada por DMG Mori funciona de manera similar a la tecnología DMT, aunque únicamente se pueden realizar impresiones con un material y no realizar aleaciones de ellos en una sola pieza. El factor diferencial de esta tecnología es que en una sola máquina se incorpora una fresadora que realiza un acabado final una vez la pieza está impresa. De este modo se consiguen acabados similares a un mecanizado, pero con un ahorro considerable de material ya que solo se deposita el material necesario para la realización de la pieza más un pequeño porcentaje para realizar el fresado correctamente controlando las tolerancias. La base de impresión es circular y puede funcionar de manera similar a un torno, imprimiendo y mecanizando material. Es capaz de realizar reparaciones en piezas ya conformadas. Es posible alternar la función de mecanizado y extrusión en cualquier momento de la impresión sin necesidad de finalizar la pieza.

Con esta tecnología sería posible realizar cualquier tipo de pieza metálica con tolerancias y acabados aptos para cualquier actividad a realizar. Según su fabricante, la impresora es



capaz de fabricar piezas metálicas de hasta 600 kg con unas dimensiones de 735mm de ancho, 650mm de profundidad y 450mm de alto. El láser utilizado es de 3,5 kW.



*Figura 32. Pieza realizada por la máquina LASERTEC 65 3D Hybrid de DMG Mori. (3dprintmagazine.eu)*



## Capítulo 4: Aplicaciones

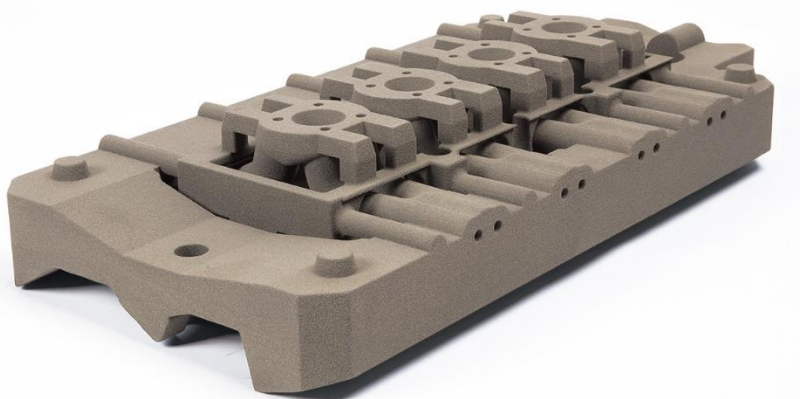
Con la irrupción de la impresión 3D de una manera más robusta, muchas han sido las industrias que han dado el paso y han empezado a producir o por lo menos prototipar objetos gracias a este método. Utilizando distintas tecnologías, dependiendo de la aplicación requerida.

### 4.1 Impresión de motores y sus componentes

Para la impresión de componentes de motores térmicos en primer lugar deberíamos considerar el material final a utilizar para poder elegir la forma de desarrollarlo.

Con el análisis realizado a las distintas tecnologías de impresión 3D, hemos visto que existen distintas opciones para poder llevar a cabo la fabricación de piezas metálicas aptas para la utilización en motores térmicos.

La empresa Voxeljet presenta dos posibilidades para la realización de piezas metálicas a través de la impresión 3D, una de ellas imprimiendo directamente un molde con silicatos para posteriormente, mediante a la colada del material, poder obtener la pieza final. Este método de fabricación sería muy similar al actual utilizado en la fabricación de componentes como: el bloque motor, el cigüeñal, cárter, culata, etc. Todos ellos se realizan gracias a un molde de arena para posteriormente llevar a cabo un mecanizado y limado de la pieza final para conseguir resultados óptimos. Existe una empresa alemana con sede en Bilbao, desarrollando una tecnología similar para la fabricación de piezas de mayor tamaño, esta tecnología todavía se encuentra en fase de desarrollo.



*Figura 33. Pieza realizada con la tecnología de impresión 3D con silicatos. (Voxeljet.com)*

Otra de las opciones que ofrece Voxeljet es la realización de la pieza final en un material plástico a modo de molde positivo para posteriormente recubrirlo con materiales cerámicos a su alrededor y con agentes aglutinantes para posteriormente, calentarlo en un horno a altas temperaturas, derritiendo y eliminando la pieza plástica, obteniendo de esta forma un molde negativo del cual se podría realizar la colada de una pieza final. Ambas tecnologías se encuentran desarrolladas en el punto 3.2.4 de este trabajo.

Otra posibilidad para la realización de piezas, utilizando la idea de Voxeljet, sería la de fabricar una pieza plástica con la forma final deseada para luego con los post-tratamientos cerámicos, realizar un molde en el que poder conformar la pieza final, de este modo podrían aprovecharse cualquiera de las tecnologías de impresión 3D de plástico descritas anteriormente.

La impresión 3D mediante polvo, como pueden ser las tecnologías de sinterización selectiva por láser, por electrones o la propia Multi Jet Fusion de HP Inc. para materiales metálicos, pueden ser buenas opciones para la realización de pequeñas piezas, en la actualidad difícilmente podrían llegar a realizar piezas críticas y funcionales en un motor térmico. No por ello no deben tenerse en cuenta, ya que, son potencialmente utilizables en piezas del motor como soportes o uniones con formas complejas que otra tecnología no es capaz de replicar. Con ello se podría llegar a ahorrar en la fabricación del propio motor como, incluso, en la eficiencia del mismo.



*Figura 34. Pieza compleja realizada con Multi Jet Fusion. (hp.com)*

Tecnologías de deposición de energía directa (DED) pueden ser grandes candidatas para su utilización en el desarrollo de piezas para motores térmicos. Tienen las ventajas de que son capaces de conseguir grandes acabados en pieza final, con buenas propiedades mecánicas a la vez que pueden, incluso, llegar a combinar distintos materiales. La solución ofrecida por DMG Mori, capaz de mecanizar la pieza una vez impresa, es una de las tecnologías óptimas para fabricar un motor por completo. Uno de los problemas que presenta esta tecnología es que requiere trabajar en una atmósfera controlada y con altas temperaturas, por lo tanto, actualmente se limita al volumen de impresión de la máquina (735mm de ancho, 650mm de profundidad y 560mm de alto), siendo capaz de soportar piezas de hasta 600kg. Esta tecnología es capaz de depositar material en piezas ya fabricadas, un punto a tener en cuenta para poder realizar reparaciones en caso de que fuera necesario.



*Figura 35. Impresora de DMG Mori en funcionamiento, aportando material y mecanizando la pieza. (dmgmori.com)*

Gracias a la impresión 3D aplicada a la fabricación de motores, sería posible realizar prototipos de una manera sencilla y rápida para poder validar un concepto en momentos de diseño de un nuevo producto o una nueva iteración, del mismo modo que podría ser utilizada en producción para la realización de piezas concretas o directamente piezas finales.

#### 4.1.2 Aplicación en un buque

La impresión 3D podría ser aplicada en un buque de diversas formas, conoceremos las que actualmente se están usando en la fabricación del mismo y posibilidades para un futuro, no muy lejano.

##### 4.1.2.1 Impresión casco

Se han realizado algunas pruebas para poder imprimir un casco de un buque mediante una impresora 3D, gracias a su capacidad para conseguir formas imposibles para otras tecnologías, es una gran fuente de innovación para conseguir nuevos resultados gracias a la hidrodinámica del casco. Actualmente Comworth Technologies, una empresa neozelandesa, está fabricando barcos de gran complejidad de formas gracias a la

impresión 3D, de este modo consiguen también una gran reducción en el tiempo y el coste de fabricación, ya que pueden realizar el molde del casco simplemente imprimiéndolo, para conseguir posteriormente los acabados necesarios, se realiza el post procesado necesario. (LucíaC., 2017)

Una empresa italiana llamada Livrea, en colaboración con Autodesk, está desarrollando el primer yate realizado completamente gracias a la impresión 3D, actualmente sus propietarios opinan que no volverán al proceso de fabricación que utilizaban anteriormente.



*Figura 36. Yate impreso íntegramente en 3D por Livrea. (livreayacht.com)*

#### *4.1.2.2 Impresión de una hélice*

Una de las grandes aplicaciones marítimas desarrolladas hasta el momento ha sido la impresión de una hélice, de 180 kg de peso y 1,3 m de diámetro, la hélice ha sido impresa en una aleación de bronce utilizando un método de impresión que utiliza arco eléctrico para la fusión del metal. Este proyecto se ha llevado a cabo por Damen shipyards group, un astillero holandés, en colaboración con Promarin, Autodesk, RAMLAB (primera empresa capaz de fabricar piezas para el ámbito naval funcionales) y Bureau Veritas.



*Figura 37. Hélice de bronce impresa en 3D. (ramlab.com)*

#### *4.1.2.3 Reparaciones en operación*

Con el estudio de las tecnologías actuales y las aplicaciones que ya se están llevando a cabo en el mercado, surge una posibilidad de implementación de una impresora 3D en un buque. Con ello se podrían realizar reparaciones de equipos y mobiliario in situ y sin necesidad de tener stock a bordo, únicamente sería necesario imprimir la pieza a sustituir y cambiarla por la pieza afectada.

Del mismo modo se podrían realizar reparaciones, gracias a tecnologías DED, piezas de un motor dañadas y que podrían ser reparadas realizando una adición de material en el lugar necesario. Para conseguir lograrlo, la tecnología actual debería democratizarse y cambiar o adaptar todo el plan de mantenimiento del buque.

Con las piezas conseguidas por máquinas como la LASERTEC 65 3D hybrid de DMG Mori, cualquier tipo de reparación, dentro de la capacidad actual en cuanto a dimensiones de la máquina, sería realizable. En este punto entraría en juego el análisis económico de la máquina y el precio por pieza. Actualmente el precio de mercado de esta máquina está en torno a los ochocientos mil dólares (800000 \$) a lo que habría que sumar el gasto operacional como sería el consumo eléctrico (producido por el buque, pero no

despreciable) y la materia prima utilizada para la fabricación de las piezas. A este cálculo se le debería disminuir el ahorro conseguido por la disminución de stock.

Con todo ello sería una buena consideración para integrarla en un buque, aun así, podrían existir alternativas más asequibles para otro tipo de aplicaciones en el buque que no requieran de tolerancias de un mecanizado para su correcto funcionamiento.

#### 4.1.3 Principales aplicaciones y negocios

La impresión 3D está siendo utilizada en muchas otras industrias desde el sector alimentario hasta la joyería. A continuación, se enumeran aplicaciones actuales relacionadas con su sector o negocio. (Fontrodona)

*Tabla 5. Aplicaciones en cada sector de la impresión 3D.*

Sector	Aplicación
<b>Alimentación</b>	Impresora 3D para la reproducción de alimentos en viajes al espacio.
	Foodini, capaz de imprimir todo tipo de alimentos no sólidos con cualquier nutriente.
	F3D pretende cocinar e imprimir alimentos, la primera en ser capaz de cocinarlos.
<b>Ámbito doméstico</b>	Impresoras con tecnología FDM con precios muy asequibles (150-1500€) para realizar pequeñas piezas a nivel usuario.



<b>Aeronáutica</b>	Boeing utiliza la impresión 3D para la fabricación de 200 piezas en 10 tipos de aeronaves. Airbus también utiliza la impresión 3D en fabricación.
	Actualmente el F-18 contiene más de 90 componentes en 3D para reducir su peso.
	General Electric construirá en poco tiempo hasta el 20% de sus turborreactores con impresión 3D de metales.
<b>Automoción</b>	3TRPD ha desarrollado una caja de cambios íntegramente impresa en 3D.
	En competición se utiliza la fabricación aditiva para conseguir diseños complejos y optimizar peso y espacio.
	Empresas de automoción utilizan la impresión 3D de metales para el prototipado de sus motores y en plástico para personalización de vehículos.
<b>Electrónica</b>	Se utiliza la impresión 3D para la fabricación de placas electrónicas ya que pueden fabricarse con materiales conductivos.
	Realización de formas complejas en placas.



<b>Deportes</b>	En Japón se utiliza para la personalización de los mangos de las espadas de esgrima.
<b>Iluminación</b>	Consecución de diseño complejos.
<b>Medicina</b>	Implantes más ligeros y adaptados a cada paciente.
	Prótesis dentales, auditivas, o en extremidades.
	Creación de tejidos.
<b>Maquinaria</b>	Piezas de producción con impresión 3D.
	Impresión de utillajes de montaje.
	Fabricación de maquinaria mediante la impresión.
<b>Moda y joyería</b>	Realización de formas complejas con metales preciosos en joyería.
	Modelos complejos en zapatería y nuevas formas en la ropa.



## Capítulo 5: Impacto medioambiental

La impresión 3D, cómo todo método de fabricación tiene un determinado impacto sobre el medio ambiente. Desde la revista "The Economist" se habla de la impresión 3D cómo una "Tercera Revolución Industrial" y para ello debe considerarse su impacto sobre el ecosistema. Desde su punto de vista se considera que el principal avance con la impresión 3D se debe gracias al abaratamiento de los costes de producción, sobre todo para pequeñas tiradas, al poder crear un solo artículo con un coste unitario cercano a la producción de unidades en masa. Ello sería beneficioso a producciones centradas en la personalización o dedicadas a fabricar piezas diferentes con un mismo proceso, de esta manera sería más sencillo y barato realizarlo.

Gracias a poder realizar pequeñas producciones, se consigue generar menos residuos que los generados para esa misma pieza en una gran producción. Siguiendo esa línea se podría dar lugar a la descentralización de la manufacturación, de tal modo que no fuera necesario centralizar las producciones industriales en las grandes ciudades, ya que cualquier municipio sería capaz de asumir el coste de una impresora 3D para producir las piezas requeridas en su propio núcleo urbano.

Con este concepto se podría incluso considerar la opción de que cada comunidad de vecinos, o incluso cada domicilio, fuera capaz de auto producir los productos que considerase necesarios.

El impacto medioambiental de la impresión 3D debería subdividirse en el producido por la operación de la propia impresora, el uso que se realice con ella y los materiales utilizados para ello. El impacto operacional, en principio debería ser respetuoso con el medio ambiente ya que se consiguen optimizar los procesos de fabricación, solo se fabrica lo necesario.

Considerando la posible huella ambiental causada por la impresión 3D, deberíamos considerar cada material utilizado en cada una de sus tecnologías. Por ejemplo, hablando de los plásticos utilizados con la tecnología FDM (extrusión de plástico) el ABS es un material derivado del petróleo y no biodegradable, aunque usado también en la industria del plástico existen alternativas cómo podría ser el PLA, un plástico biodegradable y procedente del maíz con propiedades, relativamente, similares. Todo ello variará en función del uso para el cual esté concebida la pieza y el ambiente al que deba estar expuesta.

Operacionalmente hablando la impresión 3D podría reducir el impacto ambiental, atacando de lleno a la obsolescencia programada, en el momento que un aparato tenga alguna rotura o algún fallo del cual pudiéramos ser capaces de solucionar gracias a una impresora 3D en la que, imprimiendo el diseño de dicha pieza, se consiguiera realizar una reparación que sin la impresión en tres dimensiones sería impensable poder realizarla en un domicilio particular. A continuación, se enumeran algunos de los impactos beneficiosos y perjudiciales de la impresión 3D sobre el medio ambiente.

*Tabla 6. Comparativa Impacto medioambiental.*

Impactos beneficiosos	Impactos perjudiciales
Fabricación local, reducción del transporte de mercancías.	Alto consumo energético por unidad impresa.
Ecodiseño de los bienes de consumo.	Dependencia de materiales plásticos con ciertas tecnologías.
Fabricación de series cortas, poco daño al medioambiente.	Materiales con altos niveles contaminantes.
Ventajas ecológicas y económicas del consumo colaborativo.	Impresoras 3D fabricadas sin rentabilidad o sin uso alguno.

## Capítulo 6: Análisis económico

La impresión 3D puede parecer una tecnología con un coste unitario elevado, en realidad hay que considerar los factores que influyen en el coste del producto final. Debe adaptarse el modelo de fabricación actual para conseguir optimizar al máximo los costes derivados de la impresión, de tal manera que consiga ser rentable o beneficioso económicamente hablando.

La impresión 3D es ideal para producciones con volúmenes pequeños o para la personalización de productos concretos de forma masiva. Con otros métodos de fabricación estas dos opciones son restrictivas en cuanto a coste. Del mismo modo que ofrece la posibilidad de realizar formas mucho más complejas de manera que consigue ahorrar costes por el hecho de simplificar piezas.

Comparando el precio de una misma pieza por inyección de plástico y otra impresa en 3D, el coste de impresión para una sola pieza (con la amortización del molde realizada) es prácticamente diez veces más, para ello se debe considerar que la amortización de la impresora se realiza en varios tipos de pieza y no en una sola.

Los efectos de la impresión en tres dimensiones sobre la estructura de producción actual podrían definirse con los siguientes elementos:

- Aceleración de los ciclos de desarrollo del producto.
- Aumento de la fabricación aditiva de bienes finales.
- Volatilización de las cadenas de valor.
- Menor requerimientos de transportes de productos finales.
- Cambios en las reglas de muchos negocios
- Nuevos competidores

- Concentración del valor en el diseño
- Fabricación totalmente personalizada
- Fabricación flexible, a tiempo y con calidad
- Sustitución del factor trabajo por capital
- Desaparición de los costes marginales y economías de escala

Un esquema que resume a la perfección el posible cambio en el negocio en general sería la capacidad de poder producir una idea a un coste muy bajo y gracias a ella obtener la financiación requerida para llevar a cabo el proyecto. (Fontrodona)

Anteriormente:



Actualmente:



## Conclusiones

Durante el periodo en el cual se ha realizado el trabajo se ha llevado a cabo un amplio estudio de mercado, analizando las tecnologías de impresión 3D actuales y su posible aplicación al ámbito naval.

Parece que presente y futuro pasan por la utilización de tecnologías como la impresión 3D. Cada vez resulta más sencillo obtener un acabado óptimo con la utilización de estas tecnologías. La impresión 3D consigue una rápida realización de una pieza, o directamente el plasmado de una idea; se piensa; se diseña; se imprime; se prueba, si todo está correcto, al mercado. La facilidad que conlleva su utilización hace que su aceptación en la industria sea sencilla. La posibilidad de reducir costes en la innovación y desarrollo e incluso en la propia producción, este parece el camino a seguir.

La fabricación de motores marinos y sus elementos por medio de la impresión 3D es posible en gran parte de sus piezas obteniendo resultados perfectamente válidos para su funcionamiento, la incertidumbre en cuanto a plazos y el funcionamiento óptimo de las impresoras 3D, pueden estar frenando lo que sería un gran avance en la industria, por otro lado, el coste por pieza actual de la impresión 3D sigue siendo, en algunos casos, más elevado que los modelos de fabricación convencionales.

El aprovechamiento de una impresora 3D como herramienta de mantenimiento en el interior del buque puede ser una buena manera de utilización de la tecnología, siempre considerando que sea optimizada para tipos de buque concreto y con la tecnología adecuada para cada caso.



Considerando la impresión 3D como un método de fabricación y personalización de producción, el ámbito naval puede ser un buen lugar en el cual implementar la impresión en tres dimensiones para la realización de partes del buque, impresión en distintos materiales plásticos, metálicos o cerámicos ya que se realizan en series pequeñas o incluso, en algunos casos, únicas. De este modo el coste extra que supone actualmente una personalización de una pieza se reduciría drásticamente como la posible optimización de las formas gracias a la capacidad de impresión de formas muy complejas, imposibles de conseguir con otro método de fabricación.



## Bibliografía

**3dnatives.** 3d natives. [En línea] [www.3dnatives.com](http://www.3dnatives.com).

**Arcam.** Arcam. [Online] Arcam. [www.arcam.com](http://www.arcam.com).

**Fontrodona, Jordi.** Gencat. *gencat.cat*. [Online]

**García Tapia, N. 2002.** *Tecnología e Imperio*. Madrid : Nivola, 2002.

**Giacosa, Dante.** *Motores de combustión interna*. s.l. : Hoepli.

**Giacosa, Dante.** *Motores endotérmicos*. s.l. : Hoepli.

**Helisys.** Helisys. [Online] [www.helisys.com](http://www.helisys.com).

**Insstek.** [Online] [www.insstek.com](http://www.insstek.com).

**Loughborough.** Loughborough University. [Online]  
<http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/directenergydeposition/>.

**LucíaC. 2017.** 3dnatives. *3dnatives*. [Online] Agosto 23, 2017.  
<https://www.3dnatives.com/es/top-10-aplicaciones-maritimas-la-impresion-3d-230820172/>.

**Mahle.** mahle. [Online] [www.br.mahle.com](http://www.br.mahle.com).

**mektronikar.** [Online] <http://mektronikar.blogspot.com.es/2010/09/historia-del-motor.html>.

**Pascual, Eric. 2017.** Tecnologías de fabricación en motores de combustión. Barcelona : FNB, Mayo de 2017.

**Rodríguez, Manuel. 2017.** Apuntes de la asignatura "Motores Térmicos". Barcelona : FNB, 2017.

**Sciaky.** Sciaky. [Online] [www.sciaky.com](http://www.sciaky.com).

**Singal, R.K. 2012.** *Internal Combustion Engines*. s.l. : Katson Books, 2012. ISBN 978-93-5014-214-1.

**Squatriglia, Chuck. 2010.** wired. *wired.com*. [Online] Agosto 27, 2010.

**2012.** Tecnologia marítima. [Online] Agosto 2012. <http://tecnologia-maritima.blogspot.com.es/2012/08/historia-de-los-motores-marinos-sulzer.html>.

# Anexo 1: Videografía de tecnologías de impresión 3D

## **DMG Mori LASERTEC 65 3D Hybrid:**

<https://www.youtube.com/watch?v=g8sT8ESfjrg>

<https://www.youtube.com/watch?v=L3CkzQQFZXs>

## **DMG Mori LASERTEC 30 (Polvo):**

<https://www.youtube.com/watch?v=te9OaSZ0kf8>

## **Insstek tecnología DMT:**

<https://www.youtube.com/watch?v=iMYhilG8r6o>

## **Optomec:**

<https://www.optomec.com/3d-printed-metals/lens-technology/>

## **Impresión 3D de un molde de un casco por Thermwood Corporation:**

[https://www.youtube.com/watch?v=G1F4P9O\\_CO8](https://www.youtube.com/watch?v=G1F4P9O_CO8)

## **Multi Jet Fusion:**

<https://www.youtube.com/watch?v=VXntl3ff5tc>

<https://www.youtube.com/watch?v=uX2bZculEQU>

<https://www.youtube.com/watch?v=v5lyK8ijLjg>

## Anexo 2: Artículos de aplicaciones en la industria de la impresión 3D

Actualmente empresas como BMW, Porsche, Mercedes y Audi están llevando a cabo investigaciones para poder implementar la fabricación 3D en sus vehículos, para personalizaciones y desarrollo de prototipos. Renault ha conseguido mejorar un motor de una cabeza tractora de camión gracias a la impresión 3D. En los siguientes enlaces se encuentran artículos interesantes sobre aplicaciones actualmente.

Ford:

<http://social.ford.es/es-posible-fabricar-un-coche-en-una-impresora-3d/>

General Motors:

[https://www.economiadigital.es/tecnologia-y-tendencias/general-motors-autodesk-impresion-3d-coches-eficientes\\_553661\\_102.html](https://www.economiadigital.es/tecnologia-y-tendencias/general-motors-autodesk-impresion-3d-coches-eficientes_553661_102.html)

Renault trucks:

<http://www.eleconomista.es/ecomotor/motor/noticias/8713451/10/17/Impresion-3D-en-metal-el-remedio-de-Renault-para-aligerar-un-25-los-motores-de-sus-camiones-y-mejorar-las-prestaciones.html>

<https://www.motorpasion.com/videos-de-coches/impresionante-los-camiones-renault-recurriran-a-la-impresion-3d-para-mantenerse-con-vida>

BMW:

<https://www.3dnatives.com/es/bmw-impresion-3d-18072016/>

<https://www.impresoras3d.com/bmw-pionero-y-lider-en-el-sector-automovilistico-gracias-a-la-impresion-3d/>

<http://imprimaria3d.com/noticias/2015/11/22/005491/bmw-conmemora-25-os-uso-impresion-3d>

Moto:

<https://www.impresoras3d.com/born-personaliza-moto-impresion-3d/>



